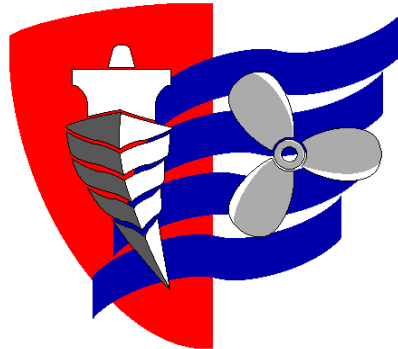


**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE NÁUTICA
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA**



Trabajo Fin de Grado

**ESTUDIO TÉCNICO DE LA PLANTA PILOTO
DEL LABORATORIO DE BIOFOULING-EMILIO
EGUÍA COMO HERRAMIENTA DE CONTROL
DEL BIOFOULING EN BUQUES MERCANTES**

**Technical study of the pilot plant of the
Biofouling-Emilio Eguía laboratory as a
biofouling control tool in merchant vessels**

**Para acceder al Título de Grado en
INGENIERÍA MARINA**

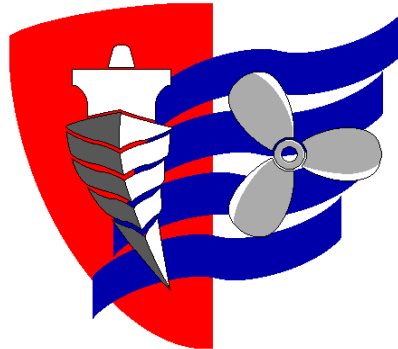
Autor: Santiago Conde Sabiote

Director: Sergio García Gómez

Octubre - 2019

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE NÁUTICA

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Trabajo Fin de Grado

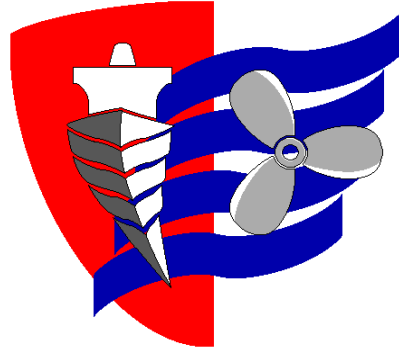
**ESTUDIO TÉCNICO DE LA PLANTA PILOTO
DEL LABORATORIO DE BIOFOULING-EMILIO
EGUÍA COMO HERRAMIENTA DE CONTROL
DEL BIOFOULING EN BUQUES MERCANTES**

**Para acceder al Título de Grado en
INGENIERÍA MARINA**

Octubre - 2019

SUPERIOR TECHNICAL SCHOOL OF NAUTICA

UNIVERSITY OF CANTABRIA



Final Degree Project

**TECHNICAL STUDY OF THE PILOT PLANT OF
THE BIOFOULING-EMILIO EGUÍA
LABORATORY AS A BIOFOULING CONTROL
TOOL IN MERCHANT VESSELS**

**To access the Degree in
MARINE ENGINEERING**

October - 2019

Agradecimientos

En primer lugar, quiero dar las gracias a todos aquellos que me han aportado algo positivo hasta el momento.

A los profesores que me dieron clase en Bachillerato.

También quiero dar las gracias a los compañeros de clase y de trabajo que me han hecho las labores más amenas y productivas.

A mi amigo Gerardo Merino Castaneda, por mostrarme otras perspectivas desde las que ver el mundo.

A mi amigo Alberto José Isla Marotías, porque con él he pasado buenos momentos desde el primer instante (y los que quedan).

A los profesores que me han impartido clase durante estos cuatro años en la Universidad, en especial a:

D. Alfredo Trueba Ruiz, por haber sido mi tutor durante mi estancia como becario de investigación en el grupo I+D+i de Biofouling.

Dña. Ana Alegría de la Colina, por los consejos que me ha dado sobre el inglés y las prácticas de embarque.

D. Carlos Javier Renedo Estébanez, por su vocación en enseñar a quienes lo desean.

D. Ernesto Madariaga Domínguez, por contar conmigo para cualquier plan y por sus habilidades diplomáticas.

D. Félix Modesto Otero González, por mostrarme la importancia que tienen las formas a la hora de hablar cuando se trasmite un mensaje o un conocimiento.

D. Jesús María Villar González, por valorar mi esfuerzo.

D. Juan Antonio Cardona Pardo, porque es un fuera de serie.

D. Luis Manuel Vega Antolín, por ser mi tutor de prácticas de embarque y por darme buenos consejos sobre estas.

D. Manuel Alfredo Girón Portilla, por mostrarme la realidad tal y como es.

Dña. María Victoria Biezma Moraleda, porque me hizo estudiar como nunca había estudiado, hecho que me enseñó a valorar el auténtico esfuerzo y gratitud que supone aprender.

D. Ramón Ignacio Diego García, por despertar mi interés en el mundo de la electricidad y la electrónica.

D. Sergio García Gómez, porque, además de haberme guiado en este trabajo fin de grado, ha supervisado mi labor como becario de investigación en el grupo I+D+i de Biofouling.

A mi familia. Especialmente a mis padres, Santiago Conde Huertas y María de los Ángeles Sabiote Sabiote, que me han apoyado siempre y han tenido paciencia conmigo durante todos estos años, no solo cuando les he dado guerra, sino también cuando lo he pasado mal. Por supuesto, también cuando compartimos los buenos momentos, que son los que hay que recordar.

“Las cosas no suceden por casualidad, sino por causalidad. Es lo que conocemos como ‘Destino’.” S.C.S



ÍNDICE DE CONTENIDOS

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA..... | 17 |
| 1.1. INTRODUCCIÓN..... | 17 |
| 1.2. PROBLEMAS CAUSADOS EN LOS EQUIPOS INDUSTRIALES AL OPERAR EN ENTORNOS MARINOS | 19 |
| 1.2.1. <i>Biofouling</i> | 19 |
| 1.2.2. <i>Corrosión</i> | 20 |
| 1.2.3. <i>Transferencia de especies invasoras</i> | 21 |
| 1.3. PROCESOS DE CRECIMIENTO DEL BIOFOULING..... | 23 |
| 1.3.1. <i>Iniciación o nucleación</i> | 25 |
| 1.3.2. <i>Transporte</i> | 25 |
| 1.3.3. <i>Fijación</i> | 26 |
| 1.3.4. <i>Eliminación</i> | 26 |
| 1.3.5. <i>Envejecimiento o maduración</i> | 27 |
| 1.4. SOLUCIONES EMPLEADAS PARA EL CONTROL DEL BIOFOULING | 27 |
| 1.4.1. <i>Métodos químicos</i> | 27 |
| 1.4.1.1. Biocidas oxidantes | 28 |
| 1.4.1.1.A Cloro-bromo | 28 |
| 1.4.1.1.B Cloro (Cl ₂) | 28 |
| 1.4.1.1.C Ozono (O ₃)..... | 29 |
| 1.4.1.1.D Dióxido de cloro (ClO ₂) | 29 |
| 1.4.1.1.E Procesos de oxidación avanzada por medios electroquímicos | 29 |
| 1.4.1.2. Biocidas no oxidantes | 31 |
| 1.4.1.2.A Mexel®432..... | 31 |
| 1.4.1.2.B NALCO® 77351, 73532 y 73503 | 31 |
| 1.4.1.3. Recubrimientos | 31 |
| 1.4.1.3.A Recubrimientos tóxicos | 31 |
| 1.4.1.3.B Recubrimientos no tóxicos | 32 |
| 1.4.1.4. Dispersantes | 33 |
| 1.4.1.5. Asfixia..... | 33 |
| 1.4.2. <i>Métodos físicos</i> | 33 |
| 1.4.2.1. Tratamiento térmico | 33 |
| 1.4.2.2. Limpieza mecánica..... | 34 |
| 1.4.2.3. Inversión del flujo | 34 |
| 1.4.2.4. Filtros y membranas | 35 |
| 1.4.2.5. Inyección de A/D en el sistema | 35 |
| 1.4.2.6. Cavitación ultrasónica | 35 |
| 1.4.2.7. Tratamiento ultravioleta | 36 |
| 1.4.2.8. Aplicación de campos electromagnéticos | 36 |
| 1.5. EL TI Y SUS ALEACIONES EN AMBIENTES MARINOS | 37 |
| 1.5.1. <i>Resistencia a la corrosión</i> | 37 |



| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 1.5.2. Biocompatibilidad | 39 |
| 2. METODOLOGÍA | 41 |
| 2.1. PLANTA PILOTO. LOCALIZACIÓN Y DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO | 41 |
| 2.1.1. Localización..... | 41 |
| 2.1.2. Descripción del equipo | 42 |
| 2.1.3. Intercambiadores de calor-condensadores..... | 43 |
| 2.2. PLANTA DE UN BUQUE LNG CON SISTEMA IEP/IFEP | 45 |
| 2.3. PLANTA DE UN BUQUE LNG CON SISTEMA DE TURBINAS DE VAPOR | 47 |
| 2.4. PLANTA DE UN BUQUE CON SISTEMA COGAS..... | 49 |
| 2.5. SOFTWARE EMPLEADO | 50 |
| 2.6. DISEÑOS EMPLEADOS PARA EL CÁLCULO | 50 |
| 3. DESARROLLO | 54 |
| 3.1. ANÁLISIS DE LA PLANTA CON SISTEMA IFEP | 54 |
| 3.1.1. Esquema de montaje | 54 |
| 3.1.2. Datos introducidos..... | 57 |
| 3.1.3. Valores de referencia | 60 |
| 3.2. ANÁLISIS DE LA PLANTA CON SISTEMA DE TURBINAS DE VAPOR..... | 60 |
| 3.2.1. Esquema de montaje | 60 |
| 3.2.2. Datos introducidos..... | 64 |
| 3.2.3. Valores de referencia | 70 |
| 3.3. ANÁLISIS DE LA PLANTA CON SISTEMA COGAS..... | 72 |
| 3.3.1. Esquema de montaje | 72 |
| 3.3.2. Datos introducidos..... | 77 |
| 3.3.3. Valores de referencia | 79 |
| 3.4. EXTRAPOLACIÓN DE DATOS DE LA PLANTA PILOTO DE BIOFOULING | 82 |
| 3.5. EVOLUCIÓN DE CADA PLANTA A PARTIR DE LOS CÁLCULOS USANDO LOS DATOS EXTRAPOLADOS DEL REGISTRO DE LA PLANTA PILOTO | 86 |
| 3.6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN | 87 |
| 4. CONCLUSIONES | 96 |
| BIBLIOGRAFÍA | 98 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 98 |
| REFERENCIAS DE ILUSTRACIONES | 106 |
| REFERENCIAS DE TABLAS | 109 |
| REFERENCIAS DE GRÁFICAS | 110 |
| ANEXO I..... | 112 |
| ILUSTRACIONES..... | 112 |
| ANEXO II..... | 132 |



RESUMEN EN CASTELLANO

El biofouling es un problema para la industria marítima, el sector naval y el sector energético. Ante la imposibilidad de eliminarlo, ya que está constantemente evolucionando y adaptándose para sobrevivir a los tratamientos químicos y físicos que se le aplican, se ha realizado este Trabajo Fin de Grado con el fin de evaluar desde otra perspectiva la posibilidad de que este fenómeno afecte en menor medida a la producción de energía. Para ello, tres modelos de sistemas para propulsión en buques mercantes han sido sometidos a evaluación. Los datos de crecimiento biológico en los buques se tomaron de la planta piloto y se extrapolaron a los intercambiadores de calor de estos para poder estudiar el impacto biológico sobre las plantas propulsoras. Los sistemas son: un sistema de propulsión híbrida (Diesel-eléctrica, IEP o IFEP), un sistema de propulsión por turbinas de vapor (ciclo Rankine con recalentamiento y extracciones) y un sistema de ciclo combinado de gas y vapor (COGAS). El último sistema se encuentra actualmente implementado en algunos tipos de buques, como los de pasaje, pero se está evaluando la posibilidad de instalarlo en los próximos buques que se construyan. Para llevar a cabo los estudios en cada sistema, en función del ensuciamiento que sufran los circuitos de refrigeración al cabo de 60 días, ha sido necesario acudir a la simulación mediante software. Los resultados revelan que este último sistema de propulsión, implementado en buques, podría abaratar las operaciones de transporte de mercancías, ya que, según estos, la caída de rendimiento y potencia en la planta COGAS son bastante menores que en las plantas IEP y de ciclo Rankine.



RESUMEN EN INGLÉS

Biofouling is a problem for the maritime industry, the naval and energy sectors. The impossibility of removing it, since it is constantly developing and changing to survive the chemical and physical treatments applied to it, this Final Degree Project has been carried out to evaluate from another perspective the possibility that this phenomenon affects smaller measure to the production of energy. To this end, three models of propulsion systems used on merchant vessels have been subjected to evaluation. Biological growth data on ships were taken from the pilot plant and extrapolated to the vessels' heat exchangers in order to study the biological impact on the propulsion plants. The systems are: a hybrid propulsion system (Diesel-electric, IEP or IFEP), a steam turbines propulsion system (Rankine cycle with reheating and extractions) and a combined gas and steam cycle system (COGAS). The last system is currently implemented in some types of vessels, such as passage vessels, but it is being evaluated the possibility of installing it in the next ships that are being built. To carry out the analysis in each system, depending on the biofouling accumulation into the refrigeration circuits after 60 days, software simulation has been necessary to use it. The results revealed that the last propulsion system, implemented in ships, could reduce the operations of transport of merchandise, since, according to these, the fall of performance and power in the COGAS plant are considerably lower than in the IEP plants and the Rankine cycle.



KEYWORDS

Balance energético, Energía térmica, Ingeniería naval, Ingeniería térmica, Máquina, Modelo de simulación, Procesamiento de datos, Termodinámica, Turbina

Data processing, Energy balance, Machines, Marine engineering, Simulation models, Thermal energy, Thermal engineering, Thermodynamics, Turbines



1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. INTRODUCCIÓN

A pesar de que constantemente se están investigando nuevos métodos de producción de energía, como por ejemplo, las pilas de combustible de óxido sólido aplicadas a un ciclo combinado [1], las fuentes de energía que predominan hoy día continúan siendo de origen fósil.

Para mejorar la eficiencia de los procesos de obtención de energía, una solución eficaz es la utilización de ciclos combinados. A través de estos ciclos se ha llegado a alcanzar hasta un 60% de aprovechamiento de los combustibles quemados. Por supuesto, estos rendimientos se evalúan todavía mucho más en plantas de generación de energía de grandes dimensiones. Así pues, en plantas eléctricas que obtienen potencias superiores a 100MW, ya sean de ciclo combinado o simple, los rendimientos obtenidos rondan, como mínimo, el 40% [1]–[4].

Dentro de los procesos de producción de energía, en aquellos sistemas en los que se involucra un proceso de transmisión de calor de un lugar a otro (normalmente, de un fluido a otro), hay que destacar la importancia de las mejoras que se están llevando a cabo a través de la investigación para lograr varios propósitos, entre ellos mejorar la conductividad térmica, tanto para favorecer como impedir la cesión de calor. Un claro ejemplo de esto es la aplicación de un material de última generación, el grafeno. Este fue probado en el rotor de las aspas de un helicóptero para aumentar la velocidad de transmisión de calor y poder disipar el calor. Adicionalmente, este dispositivo mejoraba el rendimiento de trabajo en condiciones de bajas temperaturas, ante riesgo de congelación [5].

La reducción de los costes de mantenimiento tiene varios objetivos: (1) optimizar los recursos materiales y económicos disponibles, (2) prolongar la vida útil de la maquinaria y en el mejor estado posible, (3) reducir la mano de obra y (4) reducir los tiempos de parada [6].

Para verificar que la instalación real (a nivel industrial) va a ser rentable y poder averiguar los límites de funcionamiento y problemas que puedan surgir en una operación bajo unas condiciones ambientales determinadas, se lleva a cabo la

reproducción de la instalación a escala menor, denominada planta piloto [7]. De esta manera es posible realizar toda clase de estudios de las variables que vayan a entrar en juego. También permite realizar modificaciones en el diseño y probarlo sin que ello suponga un coste excesivamente elevado, antes de trasladarlo a nivel industrial.

A partir de las mediciones obtenidas en otros experimentos, facilitadas por los investigadores del Departamento de Ciencias y Técnicas de la Navegación y Construcción Naval [8]–[10]; que han sido llevados a cabo en la planta piloto instalada en la Escuela Técnica Superior de Náutica (véase Ilustración 1), perteneciente a la Universidad de Cantabria; se han elaborado 2 modelos de simulación, basados en los sistemas de propulsión y servicio más empleados en buques gaseros: modelo de propulsión con turbinas de vapor y modelo híbrido (Diesel-eléctrico o IFEP), y se han comparado con un tercero, que actualmente está en desarrollo para este tipo de transportes especiales, pero implementado en algunos buques de pasaje [11]–[13], que es el modelo COGAS (ciclo combinado de gas y vapor), y han sido sometidos a evaluación para comprobar las características energéticas que ofrece cada uno.

Ilustración 1: intercambiadores de calor de la planta piloto del laboratorio de Biofouling-Emilio Eguía, localizado en el sótano de la ETS de Náutica.



1.2. PROBLEMAS CAUSADOS EN LOS EQUIPOS INDUSTRIALES AL OPERAR EN ENTORNOS MARINOS

1.2.1. BIOFOULING

Se trata de un proceso de adherencia y acumulación de depósitos bióticos sobre una superficie artificial en contacto con un entorno acuático natural (mar, ríos, pantanos, lagos...). Estos depósitos bióticos están formados por micro y macroorganismos propios del medio acuático [14]–[22].

Ilustración 2: distintas especies de macrofouling: entre ellas, las más reconocibles son los bivalvos (mejillones) y las algas.



Este fenómeno origina problemas en diversos sectores de la industria marina, como [14]–[29]:

- Problemas en los conductos de agua de refrigeración: (1) reducción de caudal, (2) obstrucción de conductos, (3) deterioro en bombas, (4) corrosión en intercambiadores de calor, (5) sobrecalentamiento de en las unidades de refrigeración...; es la causa principal de aumento de operaciones de mantenimiento y limpieza no programadas, además de provocar la sustitución prematura de los equipos.

Ilustración 3: fenómeno de corrosión en intercambiadores de calor.



- Problemas en el medioambiente: transporte de especies invasoras a otros lugares [14].
- Problemas en el transporte marítimo: (1) reducción de la velocidad de tránsito, (2) aumento de la resistencia al avance del casco, (3) aumento sustancial de consumo de combustible y (4) corrosión.

El biofouling puede dividirse en microfouling y macrofouling [30]. Dentro del microfouling se puede hacer una subclasificación: (1) bacterias, (2) algas unicelulares y (3) plancton (diatomeas) [20], [31]. El macrofouling puede subdividirse en 3 grupos principales: (1) mejillones, (2) percebes/lapas y (3) algas [20], [32].

Como veremos más adelante, actuando sobre determinadas variables, tales como la temperatura, superficie de adhesión, propiedades físico-químicas del agua, velocidad de flujo...[20], [33]–[35]; conseguiremos tratar el biofouling, evitando o retrasando su progreso.

1.2.2. CORROSIÓN

Referido a metales, es un ataque electroquímico de carácter destructivo. Siempre hay involucrada una reacción electroquímica con un electrolito. Existen 8 tipos principales de corrosiones metálicas, que pueden ser debidos por numerosas causas: (1) uniforme, (2) galvánica, (3) por aireación diferencial, (4) por picadura (*pitting corrosion*), (5) intergranular, (6) selectiva, (7) por erosión y (8) corrosión bajo tensión (*SCC*, *Stress*



Corrosion Cracking). Entre las causas de este fenómeno están: (1) una incorrecta elección de los materiales, (2) un mal diseño y (3) un uso inadecuado de los métodos de protección. (4) Las altas temperaturas favorecen los procesos de corrosión [36].

Bajo las circunstancias que se están tratando, en un ambiente marino con carga biológica, es indispensable hacer mención especial a un tipo de corrosión de origen microbiano: la Corrosión Inducida por Microorganismos, o, como más se la conoce, MIC (*Microbiologically Influenced Corrosion*). El primer caso registrado como tal se remonta a 1891, aunque no fue hasta mediados del siglo XX cuando se aceptó y empezó a estudiarse como otro tipo de corrosión más [20]. El proceso aparece cuando existe actividad microbiológica en la superficie de un metal. Esta actividad, generada a partir del propio metabolismo de los microorganismos, presenta una fuerte reacción con el metal [20], [35]. Existen varias teorías sobre cómo sucede, tales como la teoría de la pila de concentración celular [35], [37] o la teoría de reacción electroquímica biocatalítica (o reacción de reducción del sulfato catódico biocatalítico, mejor conocida como *biocatalytic cathodic sulfate reduction, BCSR*) [19], [37], [38]. El MIC genera corrosión localizada, generalmente, del tipo por picadura (*pitting corrosion*) [19], [37], [38].

En los años 2014-2015 se llevó a cabo un estudio en China sobre los costes económicos anuales que suponía hacer frente a los problemas de corrosión. Las cifras estimadas ascendieron a un valor equivalente de trescientos diez mil millones de dólares estadounidenses [35], [39].

1.2.3. TRANSFERENCIA DE ESPECIES INVASORAS

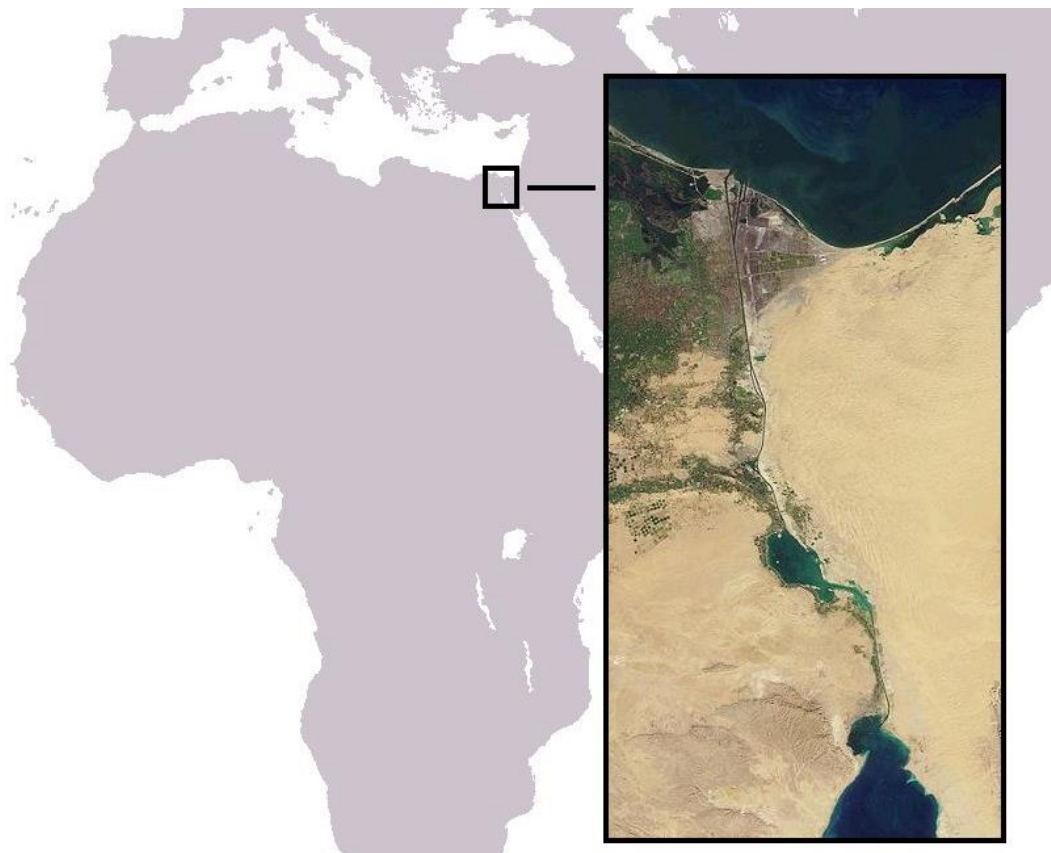
Zakaria, H. Y. [40] obtuvo, entre otras conclusiones, que “*el agua de lastre está considerada como el principal factor que afecta a la introducción de especies acuáticas no autóctonas. Un tanque de agua de lastre puede actuar como una incubadora durante la travesía para algunos organismos. Este hecho puede tener algún impacto en la liberación de especies invasoras en el puerto de destino o en las aguas costeras cercanas donde se vacían los tanques de lastre*”.

Ilustración 4: mejillón pequeño marrón (Xenostrobus securis). Esta especie de mejillón se cree que “pudo haber entrado en España junto con ostras traídas del Adriático (para comercialización), o a bordo de barcos en las aguas de lastre” [41].



Así pues, un caso especial estudiado por bastantes autores [21], [33], [40], [42]–[44] es la Migración Lessepsiana (o *Erythrean invasion*). Este hecho trata sobre la migración de especies que se produjo a raíz de la apertura del Canal de Suez, situado entre el Mar Rojo y el Mar Mediterráneo, en 1869. El propósito de esta obra de ingeniería era favorecer el comercio marítimo entre ciudades del Mediterráneo y del Océano Índico, una alternativa mucho más asequible que bordear la costa africana. La denominación de este fenómeno migratorio se debe al autor de la obra de ingeniería del Canal, Ferdinand de Lesseps. Este fenómeno se caracteriza por favorecer más a las especies provenientes del Mar Rojo que del Mar Mediterráneo, surgiendo más especies invasoras en el Mediterráneo que al revés, debido a que los organismos del primero están mejor adaptados para vivir en unas condiciones más pobres en nutrientes (entre otras causas), propias del Mar Rojo.

Ilustración 5: zona geográfica donde se sitúa el Canal de Suez, y los mares Mediterráneo y Rojo, los cuales interconecta.

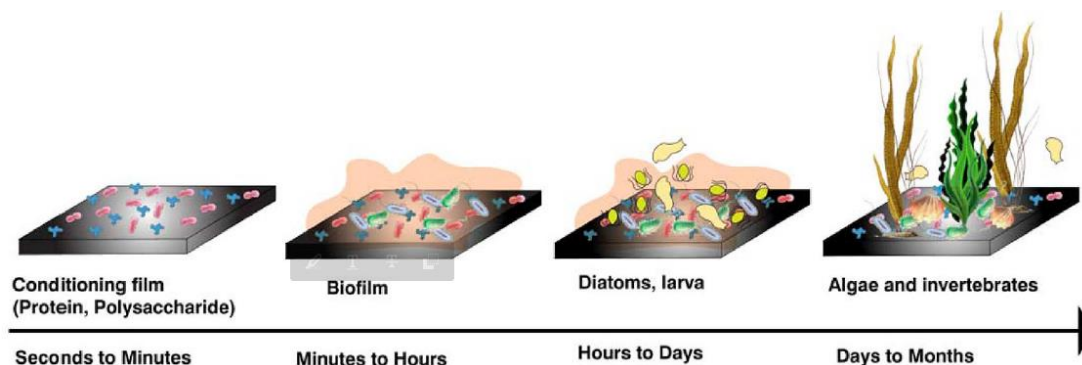


Un dato económico: en 2004 en Australia se estimó un coste económico anual debido a especies invasoras (tratamiento, daños y mantenimiento) de entre dos mil quinientos y tres mil doscientos millones de dólares estadounidenses [21], [45]; mientras que, en 2006, en los Estados Unidos, el coste anual ascendió a ciento treinta y siete mil millones de dólares [21], [46].

1.3. PROCESOS DE CRECIMIENTO DEL BIOFOULING

No existe un modelo genérico para explicar la formación de todos los organismos marinos relacionados con el biofouling [35], [47]. A pesar de ello, merece la pena explicar de una forma relativamente sencilla las fases que suceden, y que, además, forman parte de los procesos de formación y crecimiento que se dan en una gran parte de ellos. Adicionalmente, se ha incluido una explicación más en detalle recogida por Kakaç en su libro *Boilers, Evaporators, and Condensers* [25].

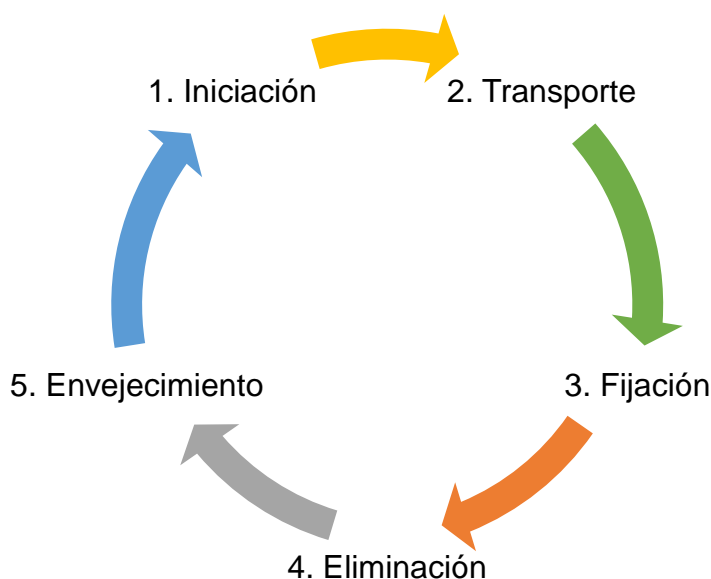
Ilustración 6: modelo común para muchas especies de organismos que producen biofouling: asentamiento y crecimiento de este sobre una superficie.



Yebra, D. M., Kiil, S. y Dam-Johansen, K. [48] describen un modelo de formación del biofouling, detallado en la Ilustración 6: (1) los microorganismos que se han adherido a la superficie comienzan a captar proteínas del entorno. (2) Poco a poco, los microorganismos comienzan a desarrollar una membrana extracelular con la que protegerse del medio exterior. (3) Cuando la membrana generada alcanza un tamaño suficiente, organismos de mayor tamaño (larvas y microalgas) comienzan a asentarse sobre esta, ya que se nutren de esta. (4) Con el paso del tiempo, otros organismos de mayor tamaño acaban asentándose, tales como invertebrados o algas.

Otro modelo, que se explica más en detalle a continuación, es el descrito por Kakaç.

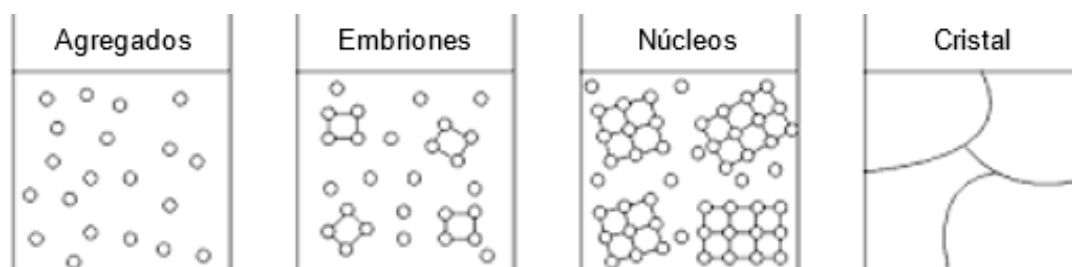
Ilustración 7: ciclo del biofouling descrito por Kakaç.



1.3.1. INICIACIÓN O NUCLEACIÓN

Corresponde al estado inicial. Es el resultado de la acumulación sobre una superficie de agregados. Una vez que alcanza un tamaño determinado, pasa a denominarse embrión. Dicho estado es de corta duración y no tarda en variar, pudiendo darse dos situaciones: que se fragmente, en cuyo caso volverá al estado inicial; o que siga creciendo para volverse más estable, dando lugar a una nueva fase, el núcleo. A partir de esta fase puede formarse un cristal o puede acabar disolviéndose [49].

Ilustración 8: formación de un cristal a través del proceso de nucleación y fases.



Factores dentro del diseño de la instalación como la temperatura, los materiales o el acabado superficial (rugosidad) determinan el tiempo que transcurrirá hasta que comience a incubar [25], [49].

1.3.2. TRANSPORTE

Representa el movimiento a través de varios mecanismos, como la difusión, la sedimentación o la termoforesis¹ de los agregados hacia la superficie del cristal. Este suceso está vinculado con la velocidad de cristalización, la cual depende del grado de impurezas y de la temperatura. Las impurezas repercuten modificando factores como la cinética de cristalización o las cualidades del cristal (parámetros fisicoquímicos). Por otro lado, la temperatura afecta a la solubilidad del medio (modificando la concentración de agregados disponibles para unirse al cristal) [25], [49].

¹ Termoforesis: movimiento de partículas pequeñas en una corriente de fluido cuando hay un gradiente de temperatura presente [25], [133].

1.3.3. FIJACIÓN

Momento en el que el biofouling se deposita y adhiere a la superficie. Éste es el motivo principal en cuanto a ensuciamiento, por el que se hace importante la selección del material, ya que sus propiedades determinarán la facilidad de adhesión [25].

1.3.4. ELIMINACIÓN

De manera natural, siempre que el depósito de biofouling se encuentre adherido a una superficie que esté expuesta a un flujo de agua con una velocidad determinada, el propio fluido actuará sobre este arrancándolo parcial o totalmente de la superficie y arrastrándolo, ya sea o a otra zona de la planta o fuera de esta [25].

Dos situaciones en las que se da la presencia de biofouling dentro de una corriente de agua son: (1) biofouling dentro de un circuito de refrigeración abierto de A/S y biofouling adherido a la obra viva de un barco (véase Ilustración 9) [25].

Ilustración 9: película de organismos marinos adheridos a la obra viva y a la hélice de un buque mercante. Llega un momento en el que la fricción generada durante el avance del buque no es suficiente como para removerlo.



1.3.5. ENVEJECIMIENTO O MADURACIÓN

En este período sucede un cambio en su disposición molecular como resultado de varias reacciones químicas. Esta alteración provoca una variación en sus propiedades físicas, de manera que permite generar una adhesión de carácter permanente. Llegados a este punto, se requerirán métodos más agresivos para retirar la película, los cuales suelen implicar la parada de la planta, y, en ocasiones, pueden dañar las superficies de los conductos [25], [27].

1.4. SOLUCIONES EMPLEADAS PARA EL CONTROL DEL BIOFOULING

Según en qué situación, los principios aplicados para combatir el biofouling son: (1) extracción mecánica o desprendimiento de depósitos, (2) matar los microorganismos que generan la biopelícula de biofouling, y (3) alteración de la superficie para evitar su adhesión [20], [50].

Adicionalmente, según el instante en el que se aplique el tratamiento (si la planta está funcionando o no), este se puede clasificar como: (1) online (operación de limpieza del circuito afectado que se realiza con la planta en marcha o parcialmente operando, es decir, no requiere detener completamente los procesos [51]) y (2) offline (operación de limpieza de una planta que previamente ha detenido sus procesos de producción para poder efectuarla [52]). Evidentemente, para poder operar de forma continuada una planta sin detenerla para realizar mantenimiento sobre un intercambiador de calor para poder limpiarlo, es necesario disponer de un duplicado, además de los sistemas de distribución para el segundo intercambiador [28], [51].

Cabe mencionar que la combinación de algunos métodos ofrece mejores resultados que empleándolos individualmente.

1.4.1. MÉTODOS QUÍMICOS

En los procesos de tratamiento es importante tener en cuenta los siguientes factores: (1) cantidad, (2) frecuencia de aplicación, (3) duración de la aplicación, (4) temperatura del medio, y (5) pH del medio [27]. Así pues, además de estos criterios, hay que tener en cuenta: (5) lo afectado que se encuentre el sistema, (6) el tipo de



agente (su agresividad), y (7) la legislación que se aplique en la zona. Basándonos en estos criterios, su método de aplicación será, o bien en dosis continuas, o bien en dosis intermitentes. Por lo general, todas serán en modo on-line.

La forma de comercialización de estos productos es en forma de: (1) pastillas, (2) polvos, (3) soluciones líquidas o (4) gaseosas, (5) disuelto en agua, o (6) directamente a través de una máquina instalada en la propia planta [27].

1.4.1.1. BIOCIDAS OXIDANTES

Su método de aplicación es a través de una inyección directa en el circuito con el agua a tratar [53]. Tipos:

1.4.1.1.A CLORO-BROMO

Su campo de aplicaciones abarca el control de bivalvos, como el mejillón cebra. Se degrada rápidamente en el medio, minimizando su impacto medioambiental una vez fuera de la instalación [27].

1.4.1.1.B CLORO (Cl_2)

Método óptimo empleado comúnmente para el control del biofouling. Presenta el inconveniente de que la reacción química produce subproductos de desinfección nocivos [53], [54].

El modo de aplicación se presenta de diversas maneras: (1) cloro líquido, (2) cloro gas, (3) hipoclorito de sodio, o (4) hipoclorito de calcio (estos 2 últimos en formato sólido, disuelto o a través de la generación por electrolisis) [27], aunque el modo más habitual es a través del penúltimo, en forma de generación a partir de la electrolisis del agua de mar [55].

Adicionalmente, a partir del proceso de cloración se forma un subproducto que se adhiere sobre las superficies del circuito. Este subproducto evita que el macrofouling se establezca encima. A cambio, se genera una pequeña pérdida de transferencia de calor [27].

1.4.1.1.C OZONO (O_3)

Sus primeros usos como agente desinfectante comenzaron a finales de 1800, en el tratamiento de potabilización de agua para consumo humano [56].

Se trata de un biocida empleado en la eliminación del macrofouling. Posee buena capacidad desinfectante, aunque económicamente es más caro que la cloración [27]. Sin embargo, para una misma dosis, el ozono es capaz de desinfectar hasta 300 veces mejor [57].

1.4.1.1.D DIÓXIDO DE CLORO (ClO_2)

Se utiliza para llevar a cabo un control microbiano en la desinfección de agua de mar y agua potable [58]–[60]. Presenta una efectividad similar al cloro, salvo que requiere una menor concentración. Entre otras ventajas, comparado con este: (1) dura menos tiempo en el medio, (2) presenta buena solubilidad en el agua, (3) no reacciona con bromuros y (4) es más eficiente a altas temperaturas y pH [61], [62]. Por estas razones, su ámbito de aplicación se ha extendido más allá del tratamiento de aguas industriales, tocando la industria alimentaria [63].

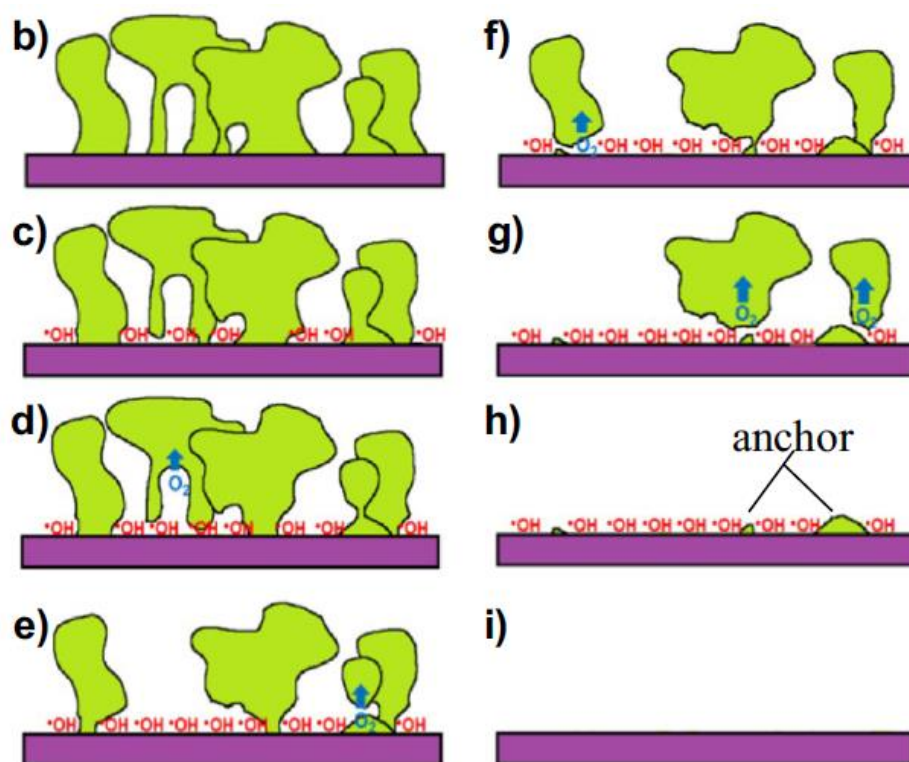
Al-Bloushi, M. *et al.* [53] llevaron a cabo un estudio con el fin de comparar la efectividad que presentaba este oxidante frente al ozono. Llegaron a la conclusión de que el dióxido de cloro mostraba una menor tasa de residuo oxidante remanente en el medio aplicado que el ozono, siempre que cumpliera con unas condiciones determinadas el agua tratada; en otras palabras: el dióxido de cloro resultaba ser mejor agente oxidante de limpieza que el ozono (y que el cloro) bajo unas determinadas condiciones (que, por lo general, dichas condiciones son las más habituales en la industria).

1.4.1.1.E PROCESOS DE OXIDACIÓN AVANZADA POR MEDIOS ELECTROQUÍMICOS

Se basa en la aplicación de superficies anódicas con capacidad de autolimpieza mediante una reacción electroquímica. Este método parte de suministrar una corriente eléctrica en el circuito afectado por el biofouling, de manera que, mediante esta corriente se produce una reacción electroquímica de oxidación cuyo producto se

interpone entre la biopelícula adherida y la superficie. El proceso de actuación consta de dos etapas: (1) inhibición del proceso de unión a la superficie de los microorganismos y (2) expulsión de los microorganismos no adheridos. La corriente eléctrica se genera gracias a las superficies conductoras expuestas en el interior del circuito de agua [64].

Ilustración 10: evolución de una superficie con biofouling mediante la aplicación de superficies anódicas con capacidad de autolimpieza mediante una reacción electroquímica. El mecanismo de inhibición de la adhesión a la superficie se logra a través de los radicales hidroxilos, los cuales se interponen entre la película y la superficie a proteger. Se puede observar que, a partir de la imagen d), comienza la segunda etapa del proceso.



El inconveniente puede presentarse si se excede la frecuencia e intensidad de la dosificación de este [65]. Estos problemas son: (1) pérdida de eficacia de autolimpieza, (2) aumento del consumo energético, (3) destrucción de las membranas, (4) descarga de productos químicos tóxicos en el medio ambiente y (5) formación de subproductos cancerígenos de desinfección [64]–[67].

El modo de aplicación consiste en generar la corriente durante un tiempo determinado por el tipo de instalación. Este período puede superar la hora (aunque depende del tamaño de la planta), y no se debe volver a usar hasta pasado un intervalo de tiempo establecido por el fabricante para dicha instalación [64].



Este método es compatible con otros tratamientos y en diversos sistemas (tanques de almacenamiento y sistemas de distribución) [64].

1.4.1.2. BIOCIDAS NO OXIDANTES

1.4.1.2.A MEXEL® 432

Producto químico no oxidante creado por la compañía francesa que lleva su nombre. Su principio de funcionamiento se basa en su actuación como tensioactivo, formando una película repelente de biofouling en las paredes de los intercambiadores de calor. Su ventaja frente a otros químicos, sobre todo frente a los de carácter oxidante, es que no contamina [22], [68], [69].

1.4.1.2.B NALCO® 77351, 73532 Y 73503

Biocida no oxidante, surgido como alternativa a los de tipo oxidante. Presentan la ventaja de que están diseñados para actuar frente a determinadas especies, y no afecta tanto sobre otras como los biocidas oxidantes [21].

1.4.1.3. RECUBRIMIENTOS

Los sistemas antiincrustantes se pueden definir como la cobertura, la pintura y el tratamiento superficial con el fin de controlar e impedir la adhesión de organismos a esta [20]. A partir de aquí, según el método que se siga, se distinguen dos tipos de recubrimientos:

1.4.1.3.A RECUBRIMIENTOS TÓXICOS

Los componentes principales de estas composiciones son biocidas, los cuales eliminan distintas especies de organismos marinos que se adhieren (o lo intentan) a la superficie. Estas partículas, con el paso del tiempo y uso, se van desprendiendo en el mar. Muchos estudios han demostrado que estos compuestos persisten en el agua, amenazando la vida marina, dañando el medio ambiente y llegando a nuestra cadena alimenticia [20].



La mayor parte de estos recubrimientos contienen bases de metales pesados u otros productos, los cuales son tóxicos para el medio marino [20], [70].

A continuación, se hablará sobre los más conocidos y empleados hasta la fecha:

- Óxido de tributilestaño (TBT): se trata de una pintura antifouling muy efectiva, hasta el punto de que resulta tan nociva para el medioambiente que se prohibió su uso en 2008 [20]. A pesar de haber abandonado su uso, Champ, M. A. and Seligman [71] estimaron que su duración en el ecosistema persistiría durante los próximos 30 años.
- Óxido de cobre: presenta muy buenas propiedades antifouling, y, al igual que el TBT, resulta tóxico para el medioambiente, aunque en menor medida. El funcionamiento de este se basa en el desprendimiento de una capa de óxido de cobre que ha reaccionado con el medio acuático, revelando una capa inferior del mismo material, que continuará protegiendo hasta que se vuelva a caer, repitiéndose así el proceso [20], [72].
- Aditivos orgánicos: aditivos introducidos en la pintura con capacidad para llevar a cabo un control del biofouling [20].

Sin embargo, además de los problemas medioambientales mencionados que causa su uso, su empleo en circuitos de A/S no es factible económicamente, ya que su tiempo de vida resultaría bajo debido al rápido desprendimiento de las superficies que sufriría, dadas las condiciones de temperatura y velocidad que debe soportar [27], [73].

1.4.1.3.B RECUBRIMIENTOS NO TÓXICOS

Su propósito es dificultar el asentamiento del macrofouling. Los recubrimientos más comúnmente empleados son de base de silicona, flúor o epoxi, entre otros [27], [74].

“La naturaleza proporciona buenos modelos antiincrustantes mediante una combinación de señales químicas y propiedades físicas, entre las que aparecen la rugosidad de la superficie. Los mejillones, cangrejos y tiburones, entre otros, poseen superficies exteriores que pueden inhibir la epibiosis y la bioincrustación” [75]–[77].

Almeida, J. R. y Vasconcelos, V. [77] reunieron en el artículo citado numerosos compuestos antifouling de origen natural, mencionando los fundamentos en los que se basan para dificultar o impedir la adhesión del biofouling, así como los métodos que

emplean determinadas especies de biofouling para asentarse en una superficie. En su estudio llegaron, entre otras, a la conclusión de que sería buena idea incluir en los métodos de control del biofouling compuestos específicos para determinados objetivos, los cuales comprendan las especies de macrofouling principales, pero que no sean tan tóxicos con el resto de las especies, de manera que su eficacia no se vea comprometida por el riesgo de perjudicar a otras.

1.4.1.4. DISPERSANTES

Compuestos empleados en combinación con cualquiera de los biocidas comentados. Su misión es impedir la concentración de microorganismos para que formen la película de biofouling sobre la que comenzar a crecer. Entre tanto, los biocidas resultan más eficientes, ya que le resulta más fácil actuar sobre los organismos separados. Su aplicación se realiza en forma de dosis intermitente [27].

1.4.1.5. ASFIXIA

Su uso se destina a operaciones offline de los circuitos de refrigeración. Consiste en parar la planta durante el tiempo suficiente como para que los propios organismos consuman todo el oxígeno disponible. Esta técnica presenta un problema, y es que este método acelera los procesos de corrosión, debido a que los organismos, en sus procesos metabólicos, generan subproductos de desecho que dañan las superficies [20], [27], [78].

1.4.2. MÉTODOS FÍSICOS

Estos métodos abarcan todo tipo de procesos físicos, y su aplicación puede ser online u offline, en función del tipo de tratamiento.

1.4.2.1. TRATAMIENTO TÉRMICO

Método online en el que se emplea un sistema de recirculación para aumentar la temperatura del agua de refrigeración que circula por los intercambiadores de calor [27]. Este aumento se consigue haciendo recircular el agua de refrigeración en circuito cerrado, es decir, sin renovarla. Esto se logra a través de un sistema de válvulas y



conductos (previo diseño de la instalación) que permite cerrar el circuito, debiendo soportar temperaturas de más de 40°C durante un período moderado [27], [78]. Un método idéntico, solo que hace circular aire caliente a mayores temperaturas (hasta 60°C) durante un poco más de tiempo que el otro, ofrece unos resultados idénticos [27], [79].

1.4.2.2. LIMPIEZA MECÁNICA

Se trata de uno de los métodos más eficaces aplicados a la hora de limpiar y retirar el biofouling adherido a las paredes. Habitualmente se emplea durante los períodos de parada (offline), ya sean forzados o programados, aplicando distintos métodos: chorreado de agua a alta presión, escobillas, robots (a veces se emplea en combinación con un tratamiento químico); pero también existen métodos online de este tratamiento, siendo los más populares los sistemas de bolas y los sistemas de escobillas alojadas en canastos. Sin embargo, para poder aplicar estos es necesario diseñar la instalación con este sistema previamente, además de combinarlo con el tratamiento de inversión del flujo. Cabe decir que el tratamiento de escobillas alojadas en canastos provoca un menor desgaste en las paredes de los conductos [27], [74], [78].

1.4.2.3. INVERSIÓN DEL FLUJO

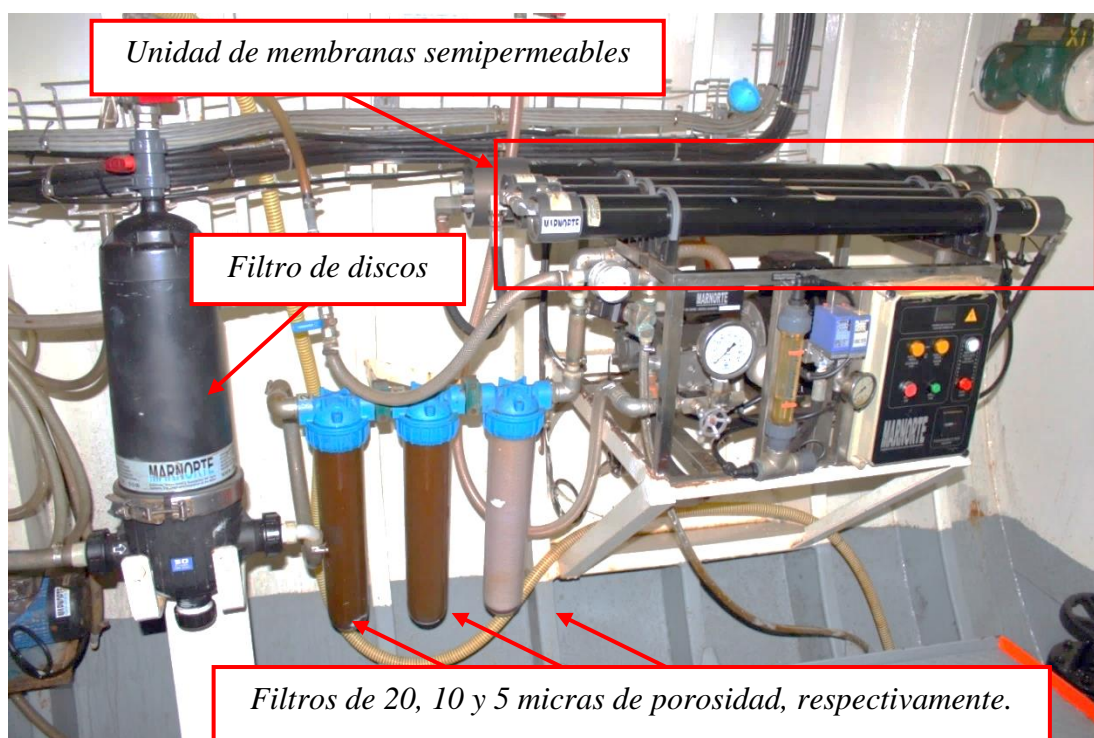
Tratamiento físico que consiste en cambiar el sentido de circulación del líquido con el fin de remover el biofouling adherido a las paredes. Su efectividad radica en aplicar un esfuerzo cortante proveniente de la circulación en sentido contrario del flujo al que está habituado a sufrir el organismo, ya que en esta situación no está preparado para resistir la misma fuerza de la corriente. La instalación debe disponer de antemano de un sistema de válvulas y tuberías que permitan invertirlo.

Eguía, E. *et al.* [70] estudiaron la combinación de este método físico con la dosificación intermitente de un biocida oxidante. Llegaron a la conclusión de que, para disminuir el impacto medioambiental que provocan los biocidas en el medio marino, en concreto el cloro, conviene usarlos junto con otro tratamiento, normalmente físico, y, en este caso, hacían referencia a la inversión del flujo en el circuito.

1.4.2.4. FILTROS Y MEMBRANAS

Método online de retención de macro y microfouling. A pesar de su efectividad, requiere limpiezas periódicas mediante la aplicación de agentes químicos, físicos (como la de rayos UV) o sustitución de estos periódicamente [80], [81]. Dependiendo de la instalación, puede admitir o no otros tratamientos en combinación.

Ilustración 11: planta de ósmosis inversa para obtener A/D. En la imagen aparecen 3 grupos de filtros señalados: el de la izquierda corresponde con un filtro de discos; el grupo del centro corresponde con 3 filtros de distinto tamaño de paso de partículas (porosidad), los cuales vienen indicados en el recuadro; y el último grupo de filtros se emplea para separar las sales del A/S mediante un proceso denominado ósmosis inversa.



1.4.2.5. INYECCIÓN DE A/D EN EL SISTEMA

Tal y como indica su nombre, la aplicación de este tratamiento consiste en hacer circular A/D en lugar de A/S a través del circuito, de manera que determinados organismos mueran a causa de su imposibilidad de adaptación al medio.

1.4.2.6. CAVITACIÓN ULTRASÓNICA

Se aplica una onda sonora de una frecuencia comprendida entre 100Hz y 100MHz para provocar una cavitación en el agua. Esta cavitación actúa sobre el biofouling adherido



a la superficie, haciendo que se separese de esta. Su aplicación es de carácter específico [27].

1.4.2.7. TRATAMIENTO ULTRAVIOLETA

Método de control del biofouling por medio de luces ultravioletas. Es muy efectivo contra determinadas especies de bacteria y disminuye la masa de biofouling [22], [82]. Sin embargo, este método tiende a usarse más para tratar pequeños volúmenes de agua, ya que requiere un mantenimiento específico y relativamente costoso [22], [83]. Otra desventaja que presenta es su nula efectividad con organismos que disponen de un caparazón, como los bivalvos adultos [27], [78].

En los sistemas de lastrado de algunos buques mercantes se emplea este método con el fin de evitar transportar especies invasoras de unas áreas a otras [84].

Marconnet, C. *et al.* [81] llevaron a cabo un estudio sobre el control del biofouling mediante el tratamiento de radiación ultravioleta. Llegaron a la conclusión de que *“la radiación UV es un pretratamiento eficaz que puede implementarse antes de llegar a las unidades de nanofiltración, en asociación con otros pasos de tratamiento previo (dosificación de antiincrustantes, regulación del pH, microfiltración, ozonización y adsorción granular de carbón activado)”*. La radiación ultravioleta es capaz de: (1) disminuir la concentración de determinadas especies, (2) reducir la película de biofouling y (3) reducir la caída de presión (como consecuencia de lo anterior) [81].

1.4.2.8. APLICACIÓN DE CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS

Método online que se lleva a cabo mediante la aplicación de campos electromagnéticos que atraviesen el agua a tratar, formando precipitados de carbonato cálcico (CaCO_3) en esta, que son arrastrados por la propia corriente del circuito. Como consecuencia, en las superficies internas del circuito de refrigeración disminuye la concentración de sólidos disueltos, mejorando los procesos de transferencia de calor, además de impedir caídas de presión excesivas y la obstrucción de los conductos de la planta. Este método mejora a medida que aumenta la alcalinidad y la dureza presente en el agua [9].

1.5. EL TI Y SUS ALEACIONES EN AMBIENTES MARINOS

Las propiedades del titanio y de sus aleaciones hacen que sea un material extraordinario para usar en todo tipo de campos: sector marítimo, aeronáutico y petroquímico, energía, transporte, medicina [19], [85]–[91]... Se caracteriza por sus propiedades físico-químicas: (1) excelente estabilidad química (alta resistencia a la corrosión) [19], [92], [93], (2) alta biocompatibilidad con los seres vivos [19], [85]–[88], (3) baja densidad, (4) alta resistencia mecánica específica [19], [94]–[96], (5) alto punto de fusión...

En el sector marítimo destaca por sus aplicaciones en intercambiadores de calor y sistemas de refrigeración, sistemas de extracción y suministro de petróleo y productos químicos [19], [94]–[96].

Entre las propiedades mencionadas, hay dos que hacen que este material sea tan polivalente: su alta resistencia a la corrosión en la gran mayoría de ambientes y su biocompatibilidad [19], [85]–[88], [92], [93].

1.5.1. RESISTENCIA A LA CORROSIÓN

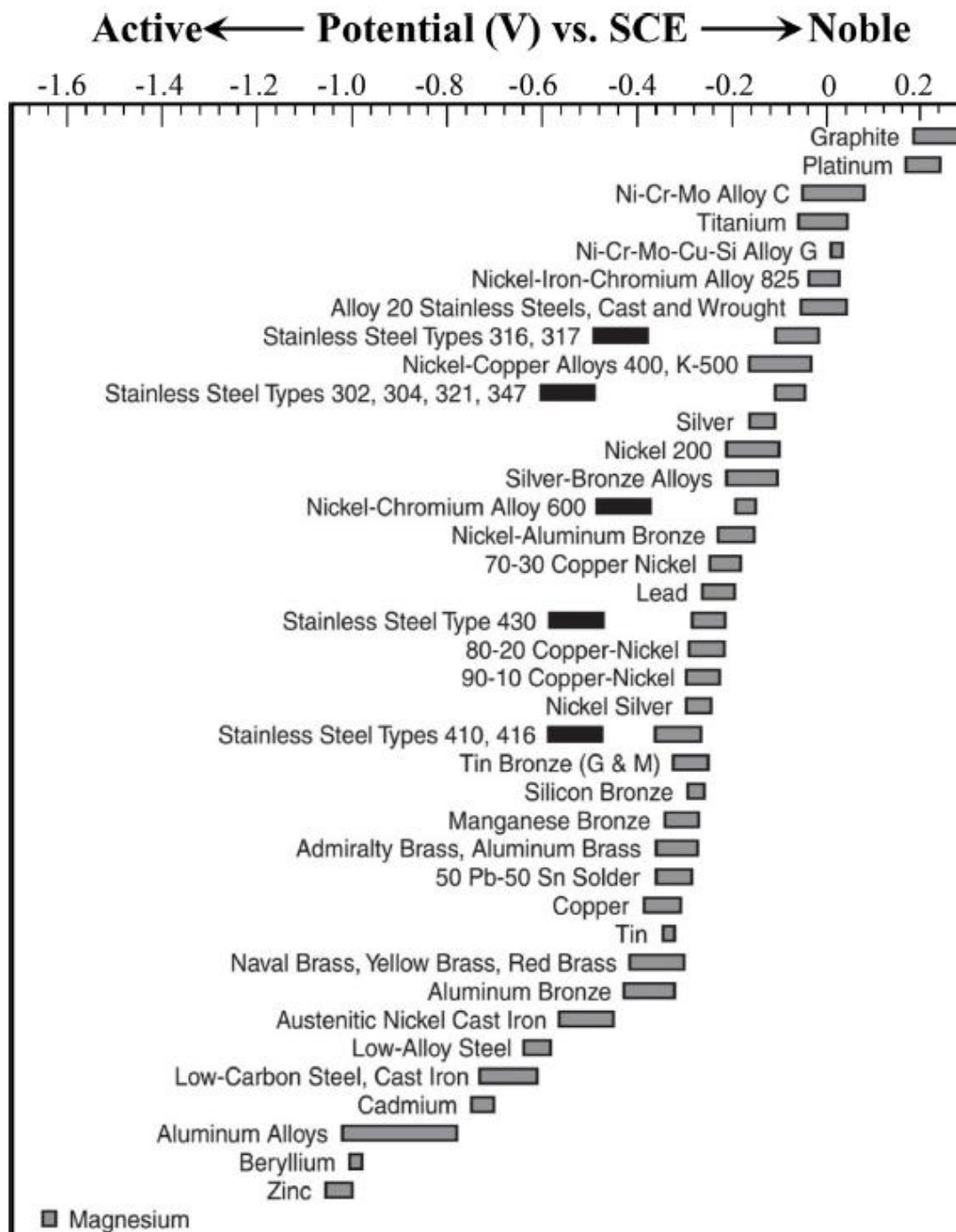
Se ha estudiado en profundidad su resistencia a la corrosión en distintos ambientes y bajo todo tipo de condiciones. El titanio presenta mejor resistencia a la corrosión que el aluminio, el acero inoxidable y el latón [19], [92], [93].

La película de óxido que se forma en la superficie de este metal tiene malas propiedades semiconductoras, lo que hace posible su alta resistencia a la corrosión [19]. Aun así, determinadas sustancias son capaces de provocar una brecha en esta capa protectora, induciendo en el material uno de los peores tipos de corrosión: la corrosión localizada. A continuación, mencionaremos algunos compuestos causantes de este problema [19]:

- Cloruros: son capaces de provocar corrosión por picadura y corrosión en resquicios. El segundo tipo de corrosión se dará siempre que el ambiente que le rodea supere los 100°C.
- Fluoruros: comparado con los otros compuestos, las soluciones ácidas de fluoruros son las que más daños provocan en la superficie de Ti. Otro factor ligado a su gran capacidad destructiva es el bajo pH del ambiente en el que se encuentra este.

- **Bromuros:** el tipo de corrosión que inducen en el titanio es generalmente por picadura.
- **Sulfatos:** aunque no es tan dañino como los anteriormente descritos, su presencia en el agua de mar (en forma de iones) hace que deba ser tratado por igual que el resto. Si lo comparamos con los otros, es necesario un mayor tiempo de exposición de la superficie metálica para que suceda la corrosión localizada.

Ilustración 12: serie galvánica en agua de mar de algunos materiales. Se puede observar que el titanio se encuentra entre los de mayor potencial positivo.





1.5.2. BIOCOMPATIBILIDAD

Aunque en algunos campos, como la medicina, esté considerado como una propiedad beneficiosa, en el ámbito marino está considerado como una desventaja. Esta propiedad facilita notablemente la adhesión y crecimiento biológico de organismos marinos, de modo que, en principio, es un grave inconveniente en todas las estructuras y componentes que deban sumergirse en agua de mar, por el hecho de que el biofouling es uno de los mayores problemas en la industria marina [19], [96]. Sin embargo, puede que este hecho no sea tan negativo después de todo.

Algunos microorganismos marinos que provocan MIC en determinadas estructuras metálicas, son capaces de aumentar la resistencia a la corrosión en el titanio. Esto se cree que es debido a que el biofouling que se adhiere a su superficie forma una película biológica que lo aísla del medio. Este fenómeno se conoce como Inhibición de la Corrosión Inducida por Microorganismos, o, como se la denomina en inglés, *Microbiologically Induced Corrosion Inhibition, MICI* [19].

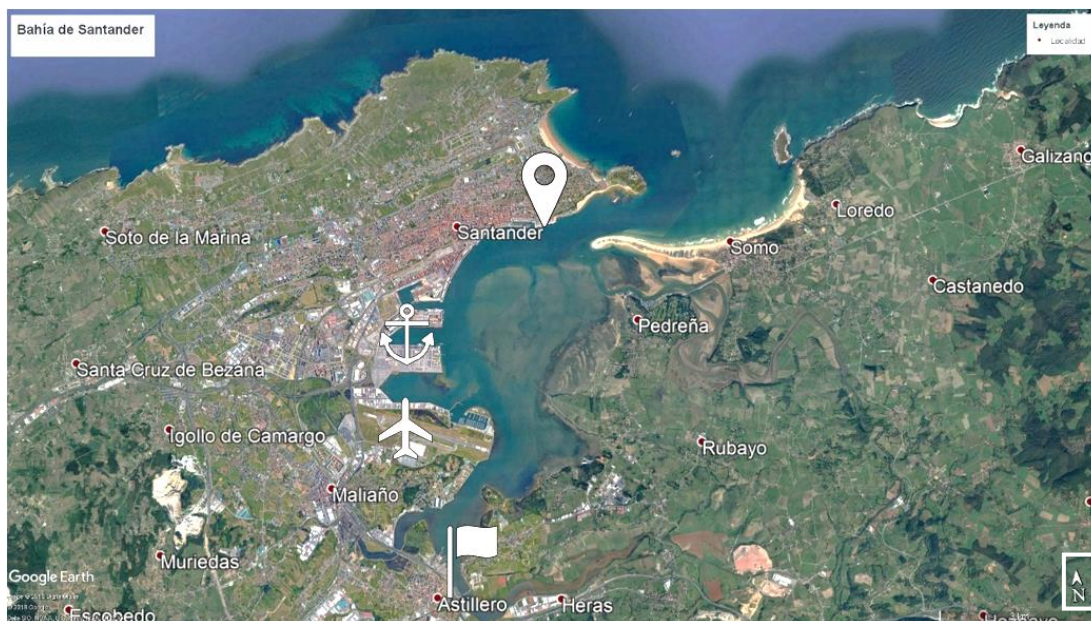
2. METODOLOGÍA

2.1. PLANTA PILOTO. LOCALIZACIÓN Y DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO

2.1.1. LOCALIZACIÓN

La planta piloto se sitúa dentro de la Bahía de Santander (véase Ilustración 13). En esta superficie de 22 km² en pleamar y 13 km² en bajamar destaca la influencia de la actividad humana a nivel industrial, la variedad de flora y fauna a encontrar y las desembocaduras de varios ríos y rías, los cuales afectan a los parámetros fisicoquímicos, tales como la densidad, la salinidad o la composición del agua [10], [97].

Ilustración 13: imagen vista satélite de la Bahía de Santander con ubicación de (de Norte a Sur): planta piloto, puerto marítimo, aeropuerto y algunos complejos industriales (astilleros, fábricas). Las rías, la ciudad, el puerto y la zona industrial influyen en el entorno de la bahía (contaminación, variación de la temperatura, parámetros del agua...).



La zona actualmente concentra casi la mitad de la población de toda la Comunidad Autónoma de Cantabria. Además, contiene una zona portuaria localizada al Oeste y Sur, donde la mayor parte del año están cargando y descargando mercancías diversos buques mercantes de carga a granel, rodada y de pasaje [10], [97].

La zona contiene una gran variedad de fauna y flora acuáticas, lo que hace que sea un lugar idóneo para la generación de biofouling [10], [97], que, junto con los factores



anteriormente descritos, agravan los efectos ocasionados en la infraestructura construida en la zona.

A la bahía desembocan varios ríos y rías. Por el Sur desembocan el Solía y el San Salvador, por el Oeste, el Boó, y por el Este, el Miera (a través de la ría de Cubas). Éste último es el que afecta más a las características fisicoquímicas cuando suceden las lluvias, pues lleva un considerable caudal de agua dulce [97].

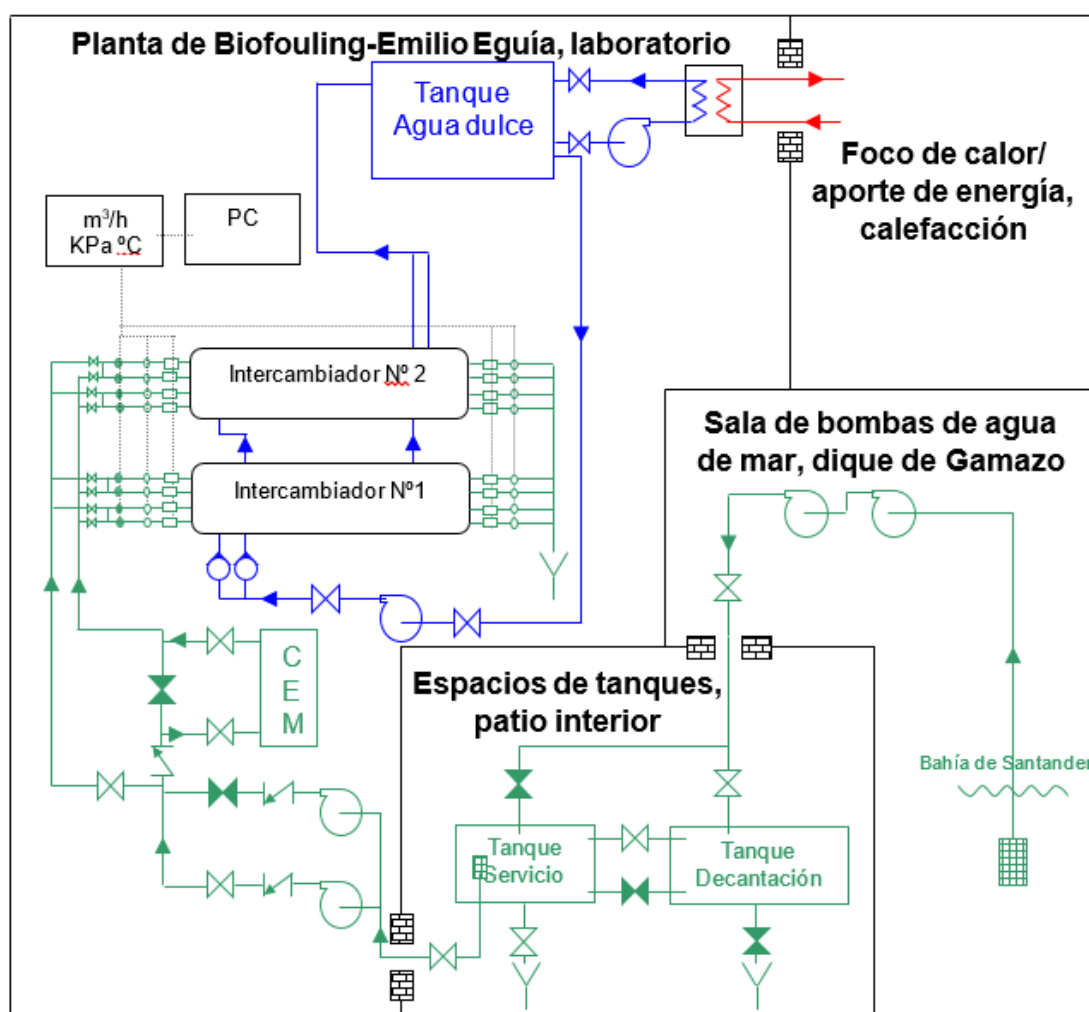
La temperatura del agua oscila entre los 14 y 22 °C a lo largo del año [10].

2.1.2. DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO

La instalación consta de varios equipos, dispuestos en 4 dependencias, como se puede observar en la Ilustración 14 [10]:

- Sala de bombas de A/S: situada en el dique de Gamazo. Contiene un filtro y dos bombas centrífugas.
- Espacios de tanques: situados en el patio interior de la ETS de Náutica. Consta de un tanque de decantación y uno de servicio.
- Planta de Biofouling-Emilio Eguía: que se corresponde con la habitación S139 de los laboratorios del sótano de la ETS de Náutica. Consta de todos los componentes para llevar a cabo los experimentos y modificaciones a estudiar: intercambiadores de calor, reactores de crecimiento, aparatos de medición, ordenadores...
- Foco de calor. Para simular una central térmica se emplea el sistema de calefacción de la ETS de Náutica.

Ilustración 14: diagrama de flujo de la planta piloto.

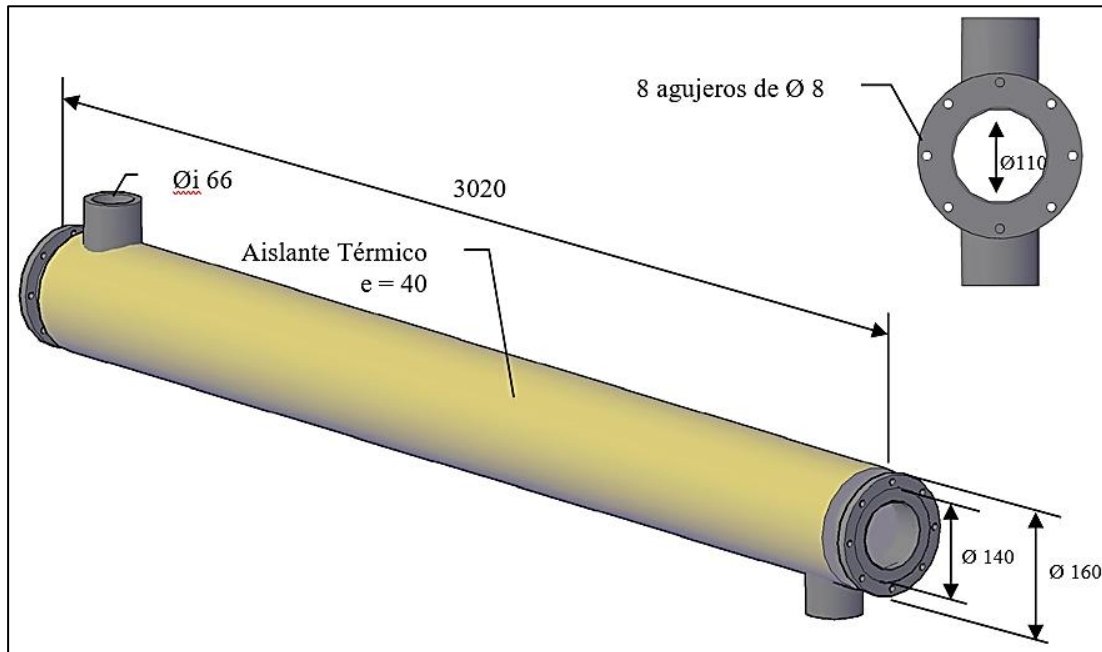


La instalación consta de 3 tipos de fluidos: A/S, agua dulce y agua de calefacción. Cada uno de estos desempeña una función. El agua salada se extrae de la bahía y se emplea para refrigerar el agua dulce. Está dispuesto en circuito abierto. El agua dulce circula en circuito cerrado y actúa como intercambiador de calor entre el agua de calefacción y el agua salada. El agua de calefacción proviene de la instalación para calentar las habitaciones, y se emplea para calentar el agua dulce [10].

2.1.3. INTERCAMBIADORES DE CALOR-CONDENSADORES

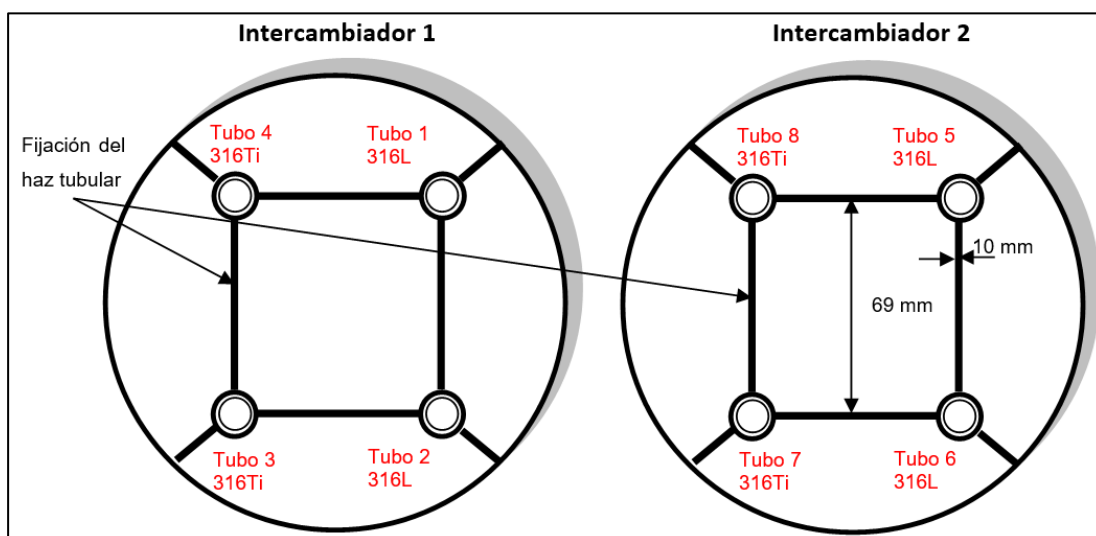
Se trata de los intercambiadores de calor de la Ilustración 1. Presentan las dimensiones expuestas en la Ilustración 15 y la Ilustración 16, y en la Tabla 1. Se pueden clasificar como intercambiadores de calor acuotubulares, de superficie no compacta, de paso simple, de dos fluidos en estado líquido, de contacto indirecto y a contracorriente [10].

Ilustración 15: dimensiones de la carcasa de los intercambiadores de calor-condensadores (cotas en mm).



La carcasa es de acero inoxidable AISI 304 (de acuerdo con la normativa *ASME*, *American Society of Mechanical Engineers*). Su exterior está recubierto por un material de fibra de vidrio, a modo de aislante térmico. Los haces tubulares están fabricados de acero inoxidable austenítico AISI 316L y 316Ti, según la normativa *ASME*. El primer tipo de haz tubular tiene una rugosidad superficial media de $0.4 \mu\text{m}$, mientras que el segundo es de $0.8 \mu\text{m}$ [10].

Ilustración 16: disposición y características de los haces tubulares.



| <i>Haz tubular</i> | <i>Material</i> | <i>Ø externo (mm)</i> | <i>Ø interno (mm)</i> | <i>Longitud (mm)</i> | <i>Peso (g)</i> |
|--------------------|-----------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|-----------------|
| 1 | 316L | 12.7 | 9.4 | 3163 | 1430.6 |
| 2 | 316L | 12.7 | 9.4 | 3163 | 1428.0 |
| 3 | 316Ti | 13 | 10 | 3163 | 1070.8 |
| 4 | 316Ti | 13 | 10 | 3163 | 1069.5 |
| 5 | 316L | 12.7 | 9.4 | 3165 | 1437.2 |
| 6 | 316L | 12.7 | 9.4 | 3165 | 1430.2 |
| 7 | 316Ti | 13 | 10 | 3165 | 1069.3 |
| 8 | 316Ti | 13 | 10 | 3165 | 1068.7 |

Tabla 1: material, dimensiones y peso de cada tubo.

2.2. PLANTA DE UN BUQUE LNG CON SISTEMA IEP/IFEP

Denominado IEP (*Integrated Electric Propulsion*) o IFEP (*Integrated Full Electric Propulsion*), es un sistema de propulsión basado en el empleo íntegro de motores eléctricos para transmitir la potencia generada a las hélices de un barco [98], [99]. La potencia se obtiene de Diesel-generadores, o, en nuestro caso, de motores Diesel Duales, que permiten usar como combustible LPG (Gases Licuados del Petróleo), Fuel Oil o Diesel [100]. Además, este sistema de propulsión conecta toda la red eléctrica del barco a los mismos generadores, tal como se muestra en el esquema unifilar de la Ilustración 17.

Ilustración 17: esquema unifilar del buque con sistema de propulsión IEP.

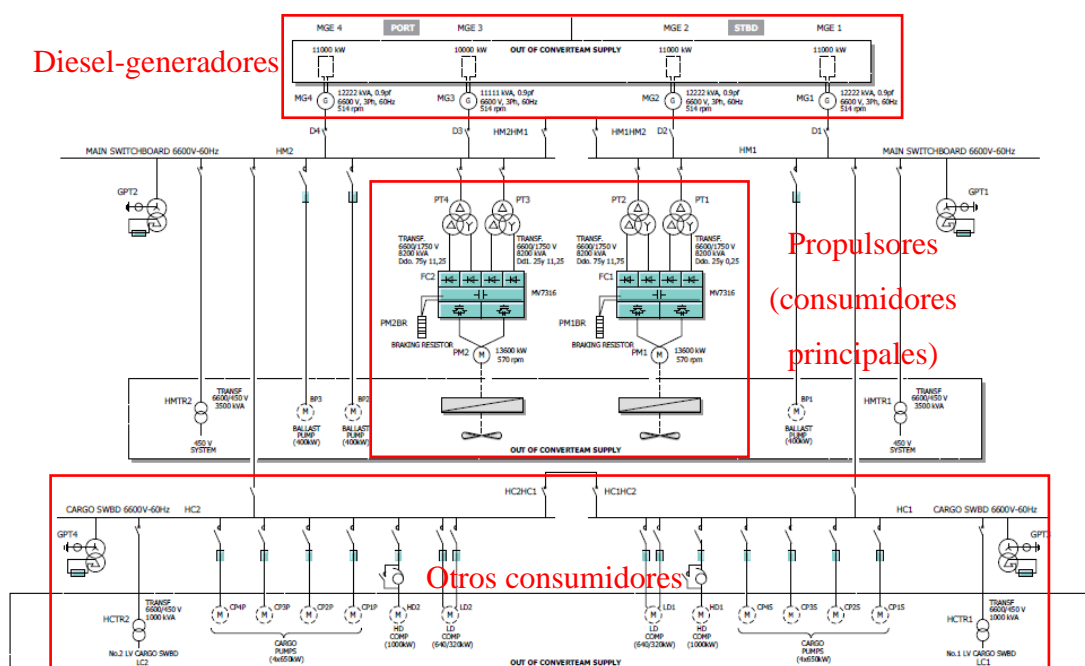


Ilustración 18: buque con sistema de propulsión IEP.



Para el caso de estudio (adviértase de la Ilustración 17 y la Ilustración 18), el buque dispone de un sistema de propulsión Diésel-eléctrica, compuesto por 3 motores Wärtsilä modelos 12V50DF y 1 motor modelo 9L50DF, cada uno capaz de generar 11400kW y 8550kW a 514rpm, respectivamente. Gran parte de la potencia generada se destina a mover dos motores eléctricos Converteam, cada uno conectado a una hélice de 5 palas de paso fijo, proporcionando una potencia de empuje de 13240kW a 77.8rpm, cada una [101], [102].



2.3. PLANTA DE UN BUQUE LNG CON SISTEMA DE TURBINAS DE VAPOR

Se trata de una planta que emplea un ciclo Rankine con recalentamiento y extracciones para generar la potencia necesaria para propulsar el barco. Parte del gasto de vapor se destina a la generación de electricidad en un turbogenerador, y se emplea otra fracción en una turbobomba para elevar la presión del flujo de agua a la entrada del generador de vapor.

Nuestro caso de estudio dispone de un sistema de propulsión con turbinas KHI (Kawasaki Heavy Industries) UA-400, capaz de entregar hasta 28000kW. La disposición de las turbinas es la siguiente: 1 etapa de alta presión, compuesta por 1 etapa Curtis dispuesta en dos filas, seguida de 8 etapas Rateau; 1 etapa de baja presión, formada por 4 etapas Rateau y 4 de reacción. La turbina de ciar está formada por 2 etapas Curtis dispuestas en dos filas. El condensador es de la misma casa constructora (KHI), mientras que los dos generadores de vapor son de Mitsubishi, modelo MB-4E, con capacidad para generar hasta 65 toneladas/h (18kg/s) de vapor a 61.8kg/cm^2 (60.61 bar o 6.06 MPa) y 515°C , cada uno [103]–[105].

Ilustración 19: disposición esquemática del generador de vapor Mitsubishi modelo MB-4E.

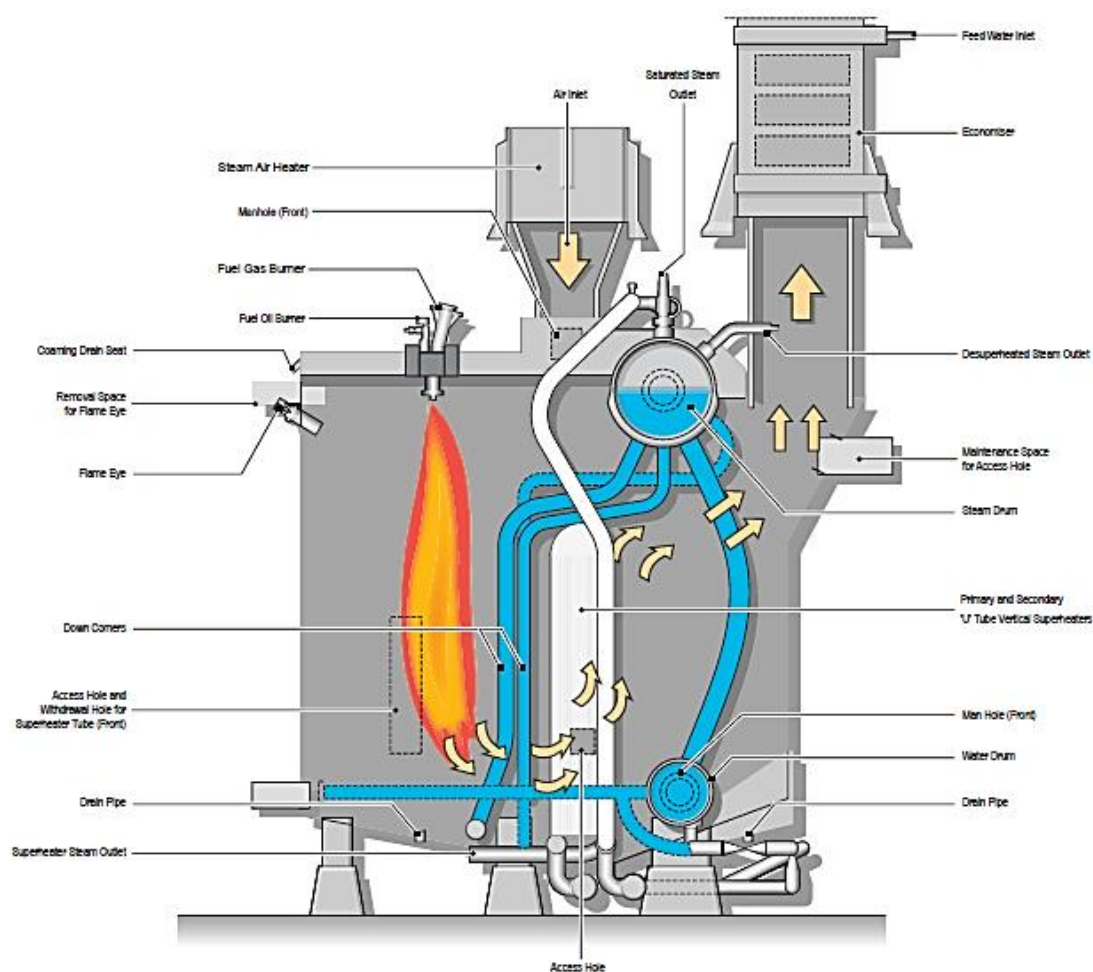


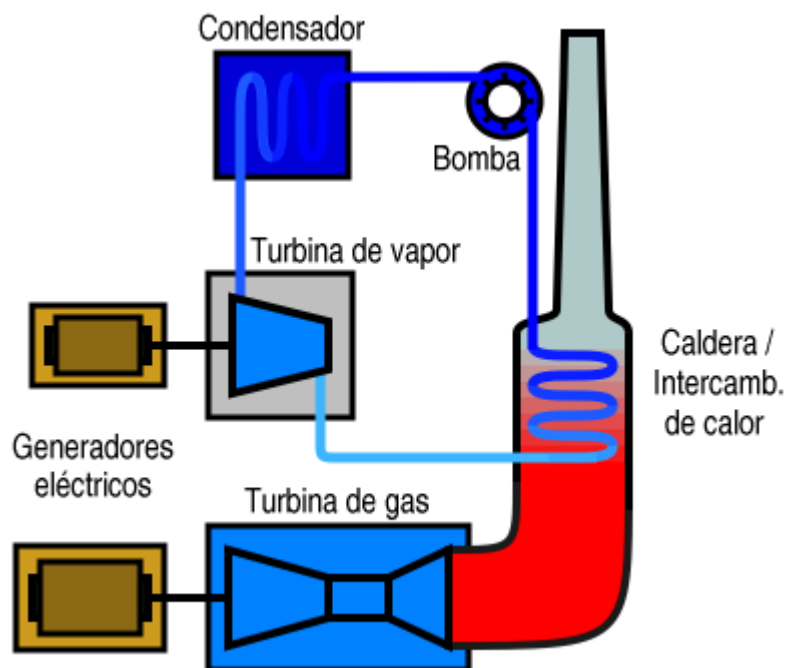
Ilustración 20: buque propulsado mediante turbinas de vapor.



2.4. PLANTA DE UN BUQUE CON SISTEMA COGAS

El sistema COGAS (*COmbined Gas And Steam*) propulsa el buque a través de motores eléctricos alimentados por generadores que se encuentran acoplados a una turbina de gas y a una turbina de vapor [106]. Este sistema aprovecha los gases de exhaustación de la turbina de gas para generar el vapor que se emplea para mover la turbina de vapor, lo que se traduce en una mejora sustancial de eficiencia (hasta un 60%, frente al 52% que se puede lograr con motores Diesel [13]). Un esquema simplificado del sistema COGAS es el que está representado en la Ilustración 21.

Ilustración 21: esquema simplificado del sistema de generación COGAS en un buque. Los generadores eléctricos suministrarían la electricidad a los motores encargados de mover la hélice.



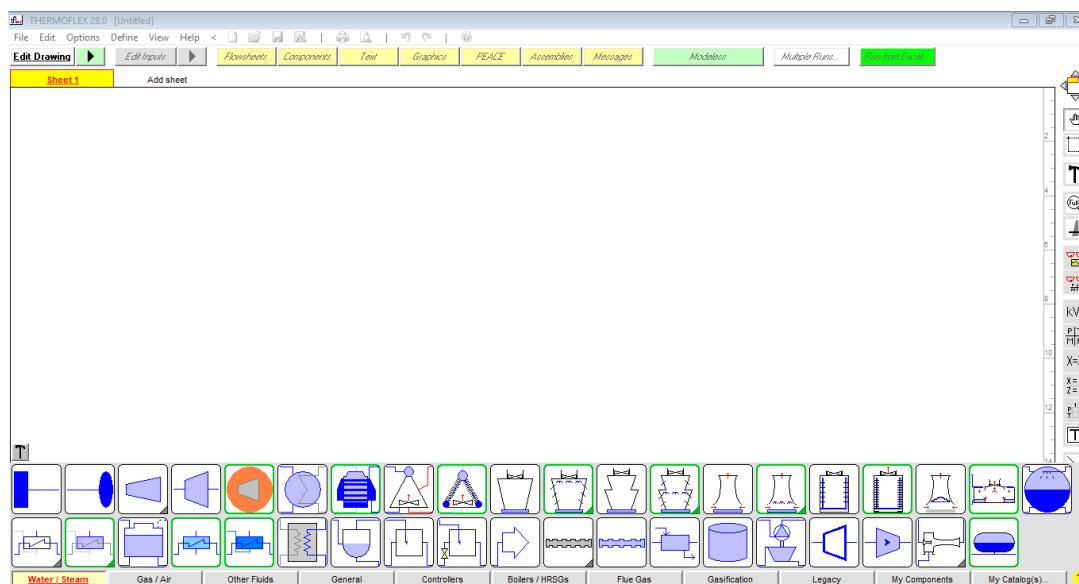
Este sistema lleva usándose desde hace varios años en otro tipo de buques, en concreto en cruceros de pasaje, y se sigue apostando por este tipo de propulsión, pues su principal ventaja radica en la reducción del espacio de máquinas necesario para albergarlo (pudiendo destinarse a otros fines), y consiguiendo la misma potencia que con un sistema de propulsión convencional que emplea motores Diesel [11]–[13].

2.5. SOFTWARE EMPLEADO

El software empleado para el estudio de los rendimientos de las plantas es Thermoflex V28. Se trata de un programa con el que se puede diseñar y calcular parámetros de centrales eléctricas térmicas, plantas frigoríficas, eólicas y solares (fotovoltaicas y termosolares), además de plantas de gasificación. Asimismo, combinado con otros programas que pertenecen a la misma compañía, permite realizar una estimación de costes de operatividad de la planta. Las centrales pueden diseñarse empleando motores de combustión interna alternativos, turbinas de gas, ciclos Rankine, Rankine con regeneración y cualquier combinación de estos ciclos y motores [107]. El software dispone de una versión gratuita limitada de prueba, Thermoflex V23, la cual se puede adquirir a través del siguiente enlace: <https://www.thermoflow.com/>. Hay que mencionar que los archivos empleados deben ser de la misma (o anterior) versión del programa, ya que, si no, éstos no se podrán ejecutar.

Adicionalmente, ha sido necesario emplear la hoja de cálculo Microsoft Excel 2016, adquirido a través del paquete Office de la Universidad de Cantabria; junto con el complemento o plug-in Elink, el cual viene incluido en el programa de Thermoflex.

Ilustración 22: interfaz de trabajo del programa Thermoflex.



2.6. DISEÑOS EMPLEADOS PARA EL CÁLCULO

Para simular las condiciones de trabajo de cada una de las plantas en el programa, se han diseñado 3 modelos:

- Una representación de la planta IFEP, Ilustración 23.
- Una representación de la planta de turbinas de vapor, Ilustración 24.
- Una representación de la planta COGAS, Ilustración 25.

Ilustración 23: esquema empleado para representar la planta propulsora con sistema IEP.

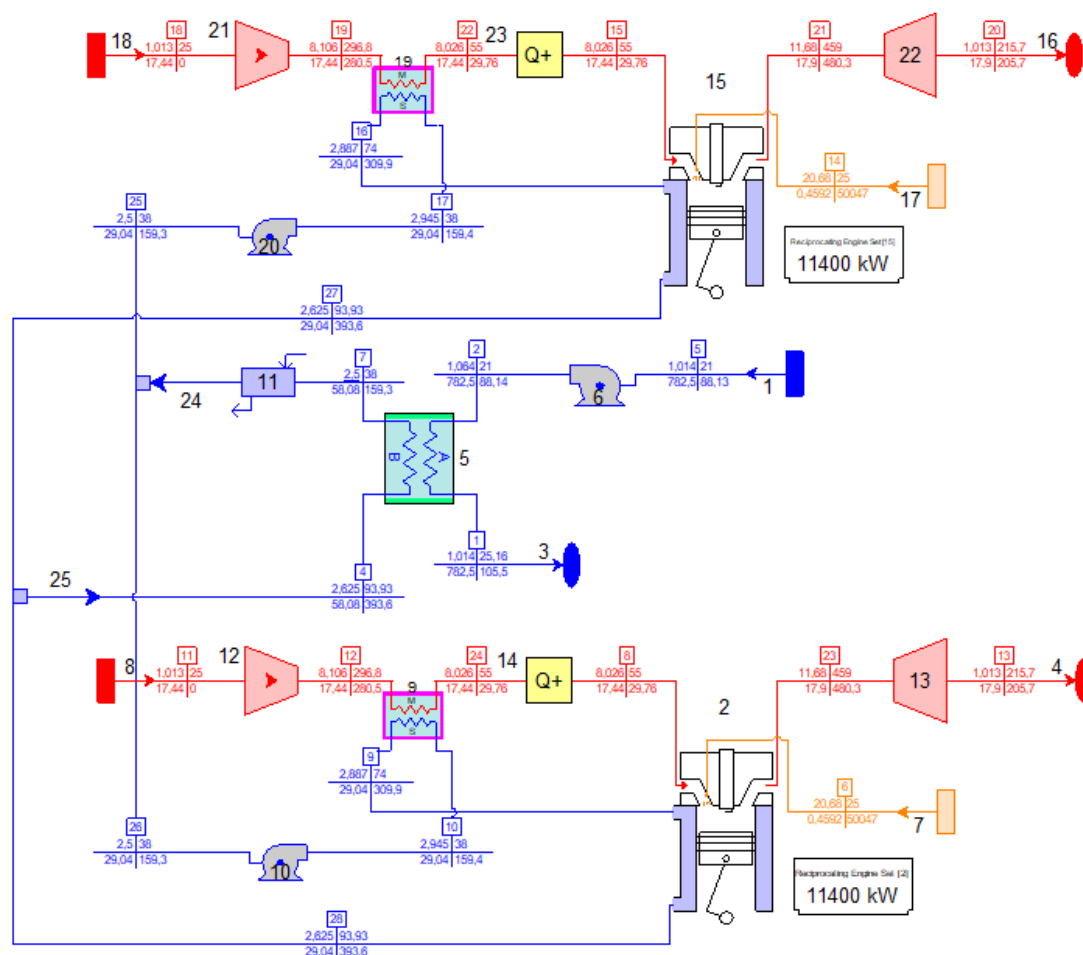


Ilustración 24: esquema empleado para representar la planta con sistema de turbinas de vapor.

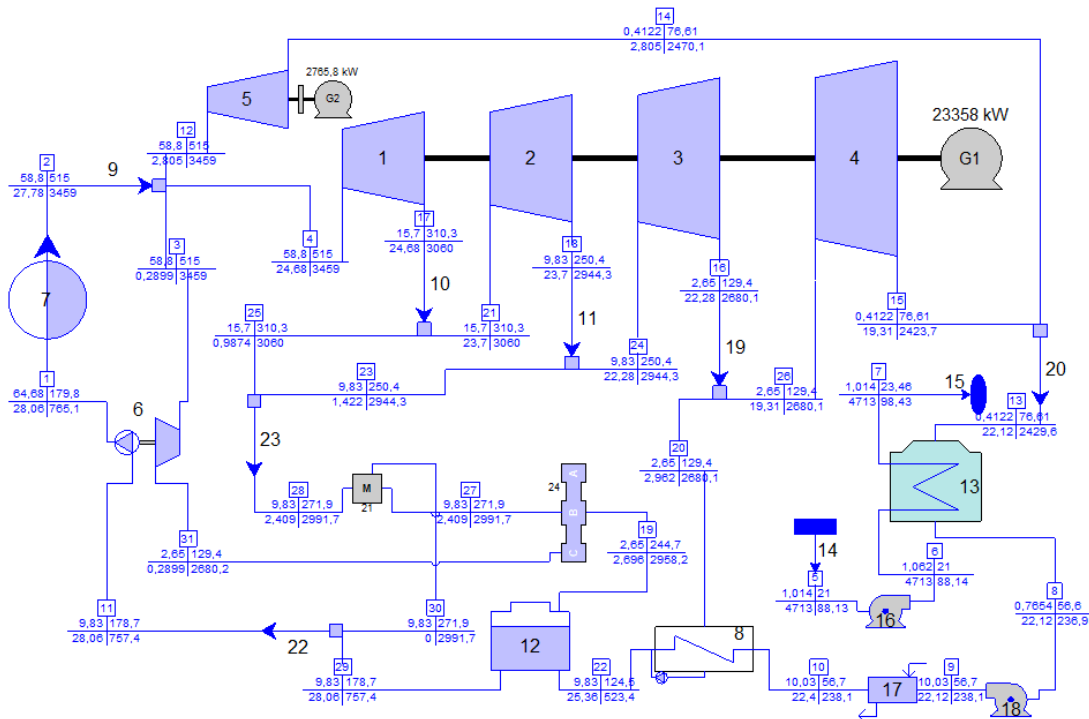
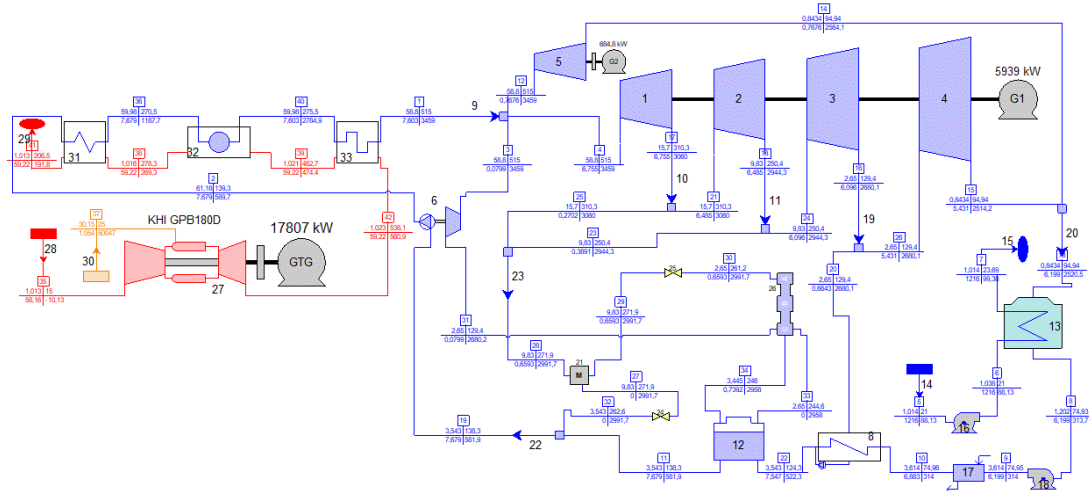


Ilustración 25: esquema empleado para representar la planta con sistema COGAS.

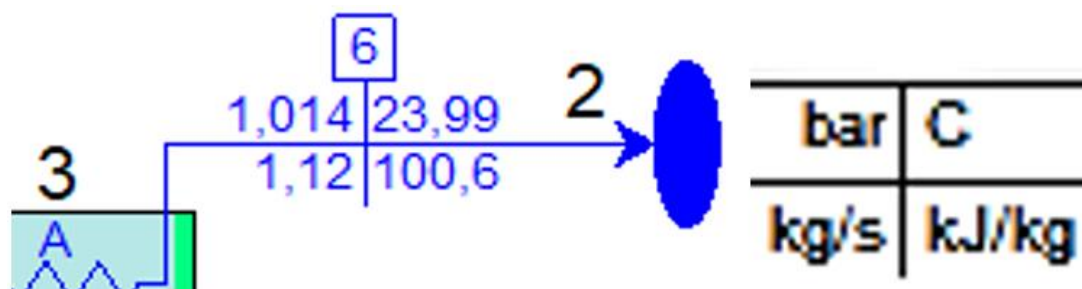


En el siguiente capítulo se detallarán los valores y condiciones de los componentes para recrear las plantas.

3. DESARROLLO

En los diagramas de las plantas aparecen 4 números en cada conexión, como se representa en la Ilustración 26, estando cada uno vinculado con un parámetro (presión, temperatura, flujo másico y entalpía específica) indicado en la unidad que se muestra a su derecha:

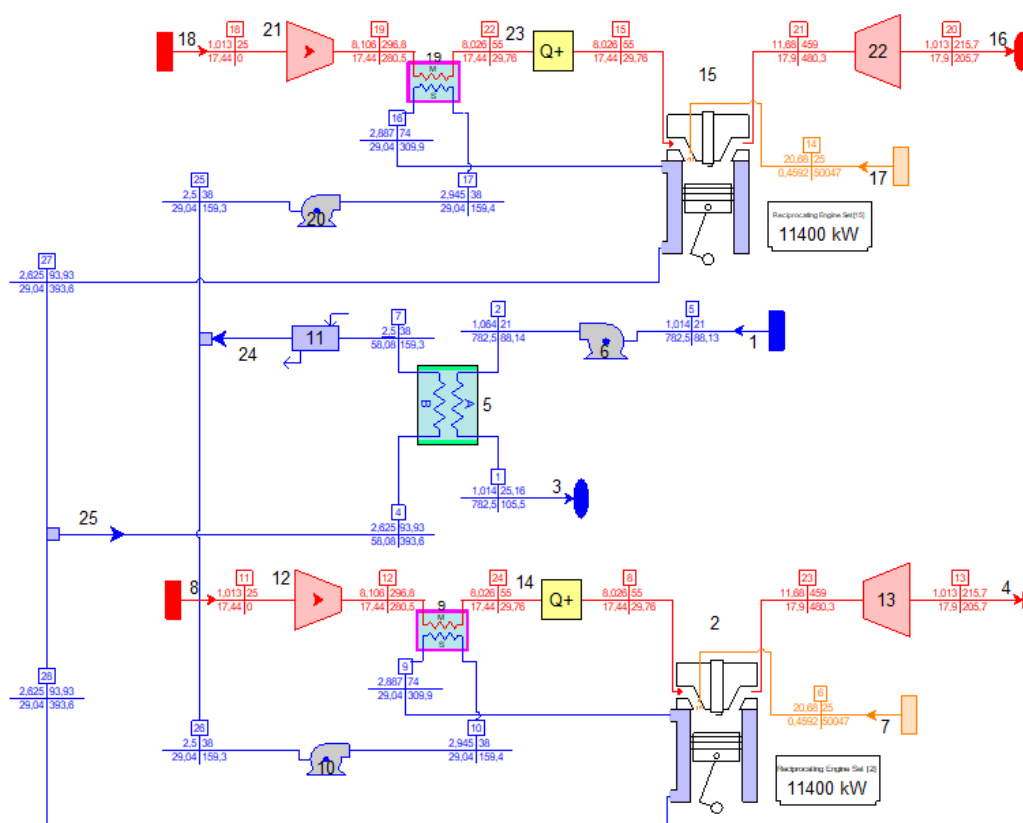
Ilustración 26: display de datos y su valor asociado según el cuadrante.



3.1. ANÁLISIS DE LA PLANTA CON SISTEMA IFEP

3.1.1. ESQUEMA DE MONTAJE

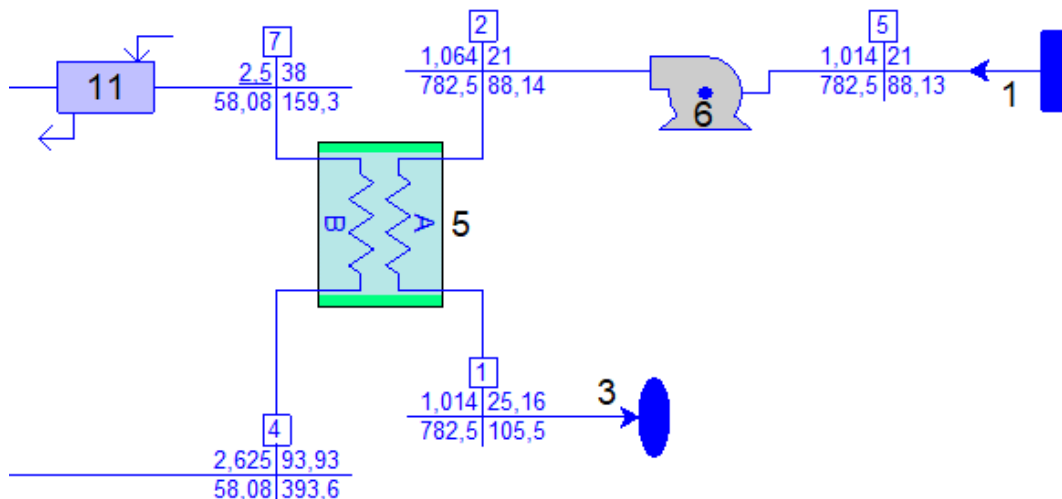
Ilustración 27: esquema empleado para representar la planta con sistema IFEP.



La planta de motores se puede dividir en 4 partes:

- **Circuito de A/S:** compuesto por una toma de agua (1) y una bomba centrífuga (6) que suministra el caudal al intercambiador de calor (5) a través de la *sección A*. El circuito abierto termina en un sumidero de agua (3).

Ilustración 28: detalle del circuito de A/S de la planta.



- **Circuito de agua de refrigeración:** a esta parte pertenece la *sección B* del intercambiador de calor (5). A su salida hay un tanque de compensación (11), seguido de un divisor de caudal (24). El caudal se reparte equitativamente entre ambos motores. Cada motor, en su parte del circuito de refrigeración consta de: bomba centrífuga (10 y 20), enfriadores de aire de barrido (9 y 19) y las tomas de entrada y salida al motor. El retorno de ambos converge en el mezclador (25).

The diagram illustrates a hydraulic system with two pumps, 19 and 9, and a motor, 3. The system is connected via a network of pipes and valves. Key components and their associated flow rates and pressures are as follows:

- Pump 19:** Located at the top center, it has an inlet flow of 2,887 l/min at 29,04 bar and an outlet flow of 2,945 l/min at 29,04 bar.
- Pump 9:** Located at the bottom center, it has an inlet flow of 2,887 l/min at 29,04 bar and an outlet flow of 2,945 l/min at 29,04 bar.
- Motor 3:** A blue cylinder located on the right side, it has an inlet flow of 1,014 l/min at 25,16 bar and an outlet flow of 782,5 l/min at 105,5 bar.
- Valves and Pipes:** The system includes several valves (1, 2, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 81, 82, 83, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 96, 97, 98, 99, 100) and pipes (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 81, 82, 83, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 96, 97, 98, 99, 100) connecting the components.

- 56

turbina y del compresor, hay que asignarles el mismo número de eje, distinto al del otro motor. El resultado se expone en la Ilustración 30 y la Ilustración 31.

Ilustración 30: detalle del circuito de aire y gases de los 2 motores.

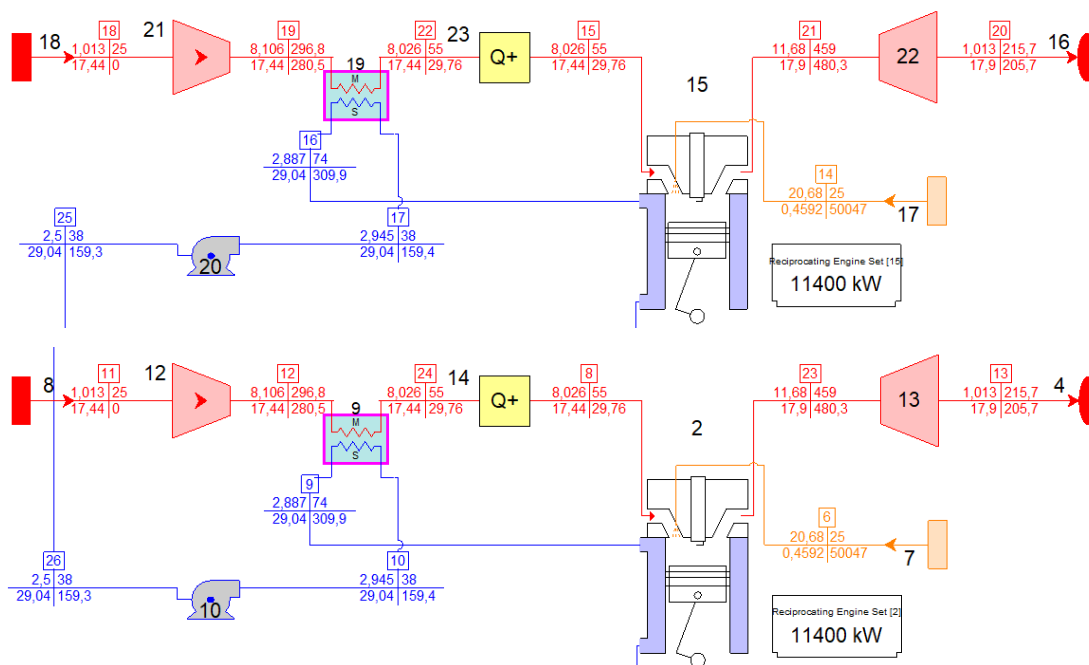
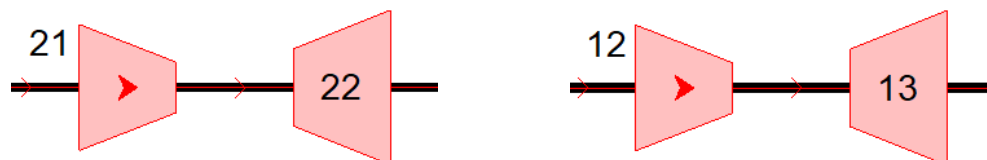


Ilustración 31: detalle del acoplamiento de la turbosoplante de cada motor.



3.1.2. DATOS INTRODUCIDOS

Los parámetros que se han introducido en cada uno de los componentes y en los motores se muestran en la Tabla 2 y en la Ilustración 32:

| Componente | Parámetro | Valor y condición |
|---------------------------------|-------------------------|-------------------|
| (1) toma de agua | Temperatura | 21°C |
| | Caudal | 782,5 kg/s |
| | Prioridad de flujo | Alta |
| (6, 10 y 20) bombas centrífugas | Eficiencia isoentrópica | 80% |
| (5) intercambiador de calor | Especificación | S |



| | | |
|----------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|--------------------------------------|
| | <i>Temperatura a la salida B</i> | <i>38°C</i> |
| | <i>Caída de presión en las vías A y B</i> | <i>5%</i> |
| | <i>Pérdidas de calor</i> | <i>0%</i> |
| <i>(11) tanque de compensación</i> | <i>Estado</i> | <i>Idéntico a la entrada</i> |
| <i>(24 y 25) divisor y mezclador de caudal</i> | <i>Fraccionamiento</i> | <i>0,5</i> |
| | <i>Prioridad de flujo</i> | <i>Baja</i> |
| <i>(9 y 19) enfriadores de aire de barrido</i> | <i>Especificación</i> | <i>SS</i> |
| | <i>Temperatura de salida del flujo de aire</i> | <i>55°C</i> |
| | <i>Temperatura a la salida del agua de refrigeración</i> | <i>74°C</i> |
| | <i>Caída de presión en el lado de aire</i> | <i>1%</i> |
| | <i>Caída de presión en el lado de agua de refrigeración</i> | <i>2%</i> |
| | <i>Prioridad de flujo</i> | <i>Alta</i> |
| <i>(7 y 17) fuente de combustible</i> | <i>Tipo combustible</i> | <i>Metano (CH₄), 25°C</i> |
| <i>(8 y 18) fuente de aire</i> | <i>Presión</i> | <i>Atmosférica (1,01324 bar)</i> |
| | <i>Temperatura</i> | <i>25°C</i> |
| | <i>Humedad relativa</i> | <i>60%</i> |
| | <i>Prioridad de flujo</i> | <i>Baja</i> |
| <i>(12 y 21) compresores de las turbosoplantes</i> | <i>Ratio de compresión</i> | <i>8</i> |
| | <i>Eficiencia politrópica</i> | <i>90%</i> |
| | <i>Obtención de energía mecánica</i> | <i>A través de eje externo</i> |
| | <i>Eficiencia mecánica</i> | <i>99,8%</i> |
| <i>(13 y 22) turbinas de las turbosoplantes</i> | <i>Ratio de presiones</i> | <i>11,51313</i> |
| | <i>Eficiencia politrópica</i> | <i>63%</i> |
| | <i>Eficiencia mecánica</i> | <i>99,8%</i> |
| | <i>Especificación</i> | <i>Indicar temperatura de salida</i> |
| <i>(14 y 23) Heat Adders</i> | <i>Caída de presión y pérdidas de calor</i> | <i>0%</i> |

Aumento de temperatura (inicial) 0°C

Tabla 2: parámetros a introducir para recrear el modelo en el programa.

Ilustración 32: datos introducidos en el modelo de motor 12V50DF. Los parámetros de peso y tamaño son indiferentes para nuestro caso.

| Genset Specification | | Genset Fuel Consumption | |
|----------------------------|-------------|-------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| Engine ID | 0 | Rating LHV | 28 MJ/Nm3 |
| Manufacturer | WAR | <input checked="" type="checkbox"/> Estimate part load data | |
| Model number | 12V50DF_gas | 100 % Load | 6879 Heat Rate Btu/kWh(L) |
| Engine RPM | 514 | 75 % Load | 7319 Heat Rate Btu/kWh(LHV) |
| Full load generator power | 11400 kW | 50 % Load | 8196 Heat Rate Btu/kWh(LHV) |
| Full load generator eff. | 98,75 % | 25 % Load | 10830 Heat Rate Btu/kWh(LHV) |
| Full load exhaust temp. | 459 C | | |
| Full load exhaust flow | 17,9 kg/s | | |
| Primary heat recovery rate | 2430 kW | Genset LHV Efficiency | |
| 2nd heat recovery rate | 0 kW | 100 % Load | 49,6 % |
| 3rd heat recovery rate | 0 kW | 75 % Load | 46,63 % |
| 4th heat recovery rate | 0 kW | 50 % Load | 41,63 % |
| Estimated other heat loss | 412,9 kW | 25 % Load | 31,51 % |
| Min. allowed part load | 40 % | Engine LHV Efficiency | |
| | | 100 % Load | 50,23 % |
| | | 75 % Load | 47,27 % |
| | | 50 % Load | 42,37 % |
| | | 25 % Load | 32,51 % |
| Overall Size & Weight | | Fuel Type | NOx Level |
| Overall length | 15,83 m | <input checked="" type="radio"/> Gas <input type="radio"/> Diesel | <input type="radio"/> Unknown <input checked="" type="radio"/> <= 250 mg/Nm3 |
| Overall width | 4,269 m | Frequency | <input type="radio"/> <= 500 mg/Nm3 <input type="radio"/> > 500 mg/Nm3 |
| Overall height | 4,904 m | <input type="radio"/> 50 Hz <input checked="" type="radio"/> 60 Hz | Aspiration |
| Overall weight | 219770 kg | Rating | <input type="radio"/> Turbocharged |
| | | <input type="radio"/> Prime <input checked="" type="radio"/> Continuous | <input type="radio"/> Turbocharged/Aftercooled |
| | | | <input checked="" type="radio"/> Naturally aspirated |

El calentador o *Heat Adder* (véase Ilustración 33) se ha añadido intencionadamente para poder simular más fielmente las consecuencias de un peor enfriamiento del aire de barrido, ya que el programa no considera que la pérdida de capacidad de refrigeración afecte a las características de este.

Ilustración 33: ventana de edición del calentador (*Heat Adder*).

Specification

Specified temperature change

☐ Connect heat transfer to another Heat Adder

Pressure drop 0 %

Heat loss 0 %

Temperature Change

☐ Temperature rise 0 C

☒ Temperature drop 0 C

3.1.3. VALORES DE REFERENCIA

Con el circuito descrito y los datos introducidos se han obtenido los parámetros de funcionamiento de referencia, los cuales quedan recogidos en la Tabla 3:

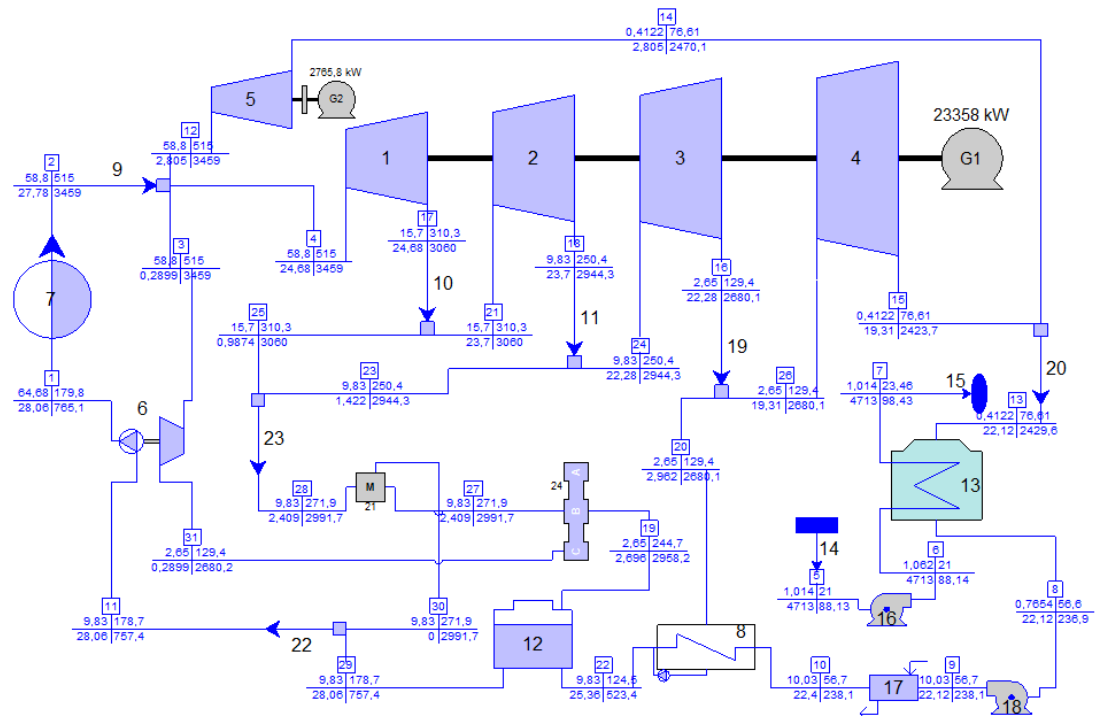
| <i>Sumario de planta</i> | <i>Unidad</i> | <i>Valor</i> |
|--------------------------------------------------------------------------|------------------|---------------------|
| <i>Presión atmosférica</i> | <i>bar</i> | <i>1,013</i> |
| <i>Temperatura del medio</i> | <i>°C</i> | <i>15</i> |
| <i>Humedad relativa del ambiente</i> | <i>%</i> | <i>60</i> |
| <i>Temperatura ambiente del bulbo húmedo</i> | <i>°C</i> | <i>10,82</i> |
| <i>Potencia neta</i> | <i>kW</i> | <i>22456</i> |
| <i>Equipos auxiliares</i> | <i>kW</i> | <i>-237,7</i> |
| <i>Pérdidas del transformador</i> | <i>kW</i> | <i>-114</i> |
| <i>Potencia total</i> | <i>kW</i> | <i>22808</i> |
| <i>Rendimiento neto considerando un Poder Calorífico Inferior</i> | <i>%</i> | <i>48,86</i> |
| <i>Rendimiento neto considerando un Poder Calorífico Superior</i> | <i>%</i> | <i>44,03</i> |
| <i>Entrada de combustible gaseoso neto (Poder Calorífico Inferior)</i> | <i>kW</i> | <i>45964</i> |
| <i>Entrada de combustible gaseoso neto (Poder Calorífico Superior)</i> | <i>kW</i> | <i>51002</i> |

Tabla 3: resumen de la planta con sistema IFEP. En los tres casos de estudio conviene fijarse detenidamente en los valores resaltados en negrita, pues son los valores principales que evaluaremos para obtener las conclusiones.

3.2. ANÁLISIS DE LA PLANTA CON SISTEMA DE TURBINAS DE VAPOR

3.2.1. ESQUEMA DE MONTAJE

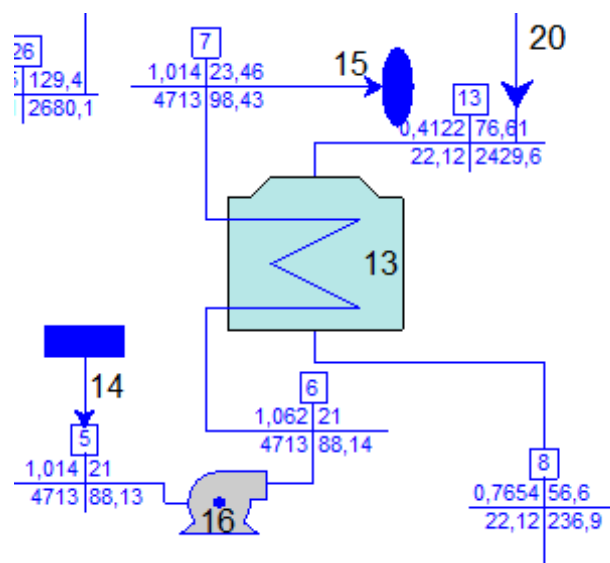
Ilustración 34: esquema empleado para representar la planta con sistemas de turbinas de vapor.



La planta de turbinas se puede dividir en 3 partes:

- **Circuito de A/S:** compuesto por una toma de agua (14) y una bomba centrífuga (16), que proporciona A/S al condensador (13). El circuito abierto termina en un sumidero de agua (15).

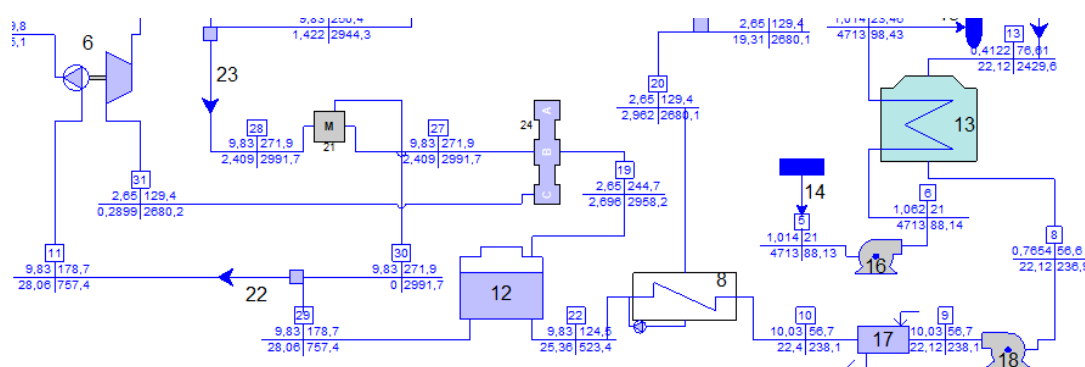
Ilustración 35: detalle del circuito de A/S del condensador.



- **Etapas de condensación, recuperación de las extracciones y elevación de la presión:** la etapa de condensación comprende el condensador (13) y la bomba de

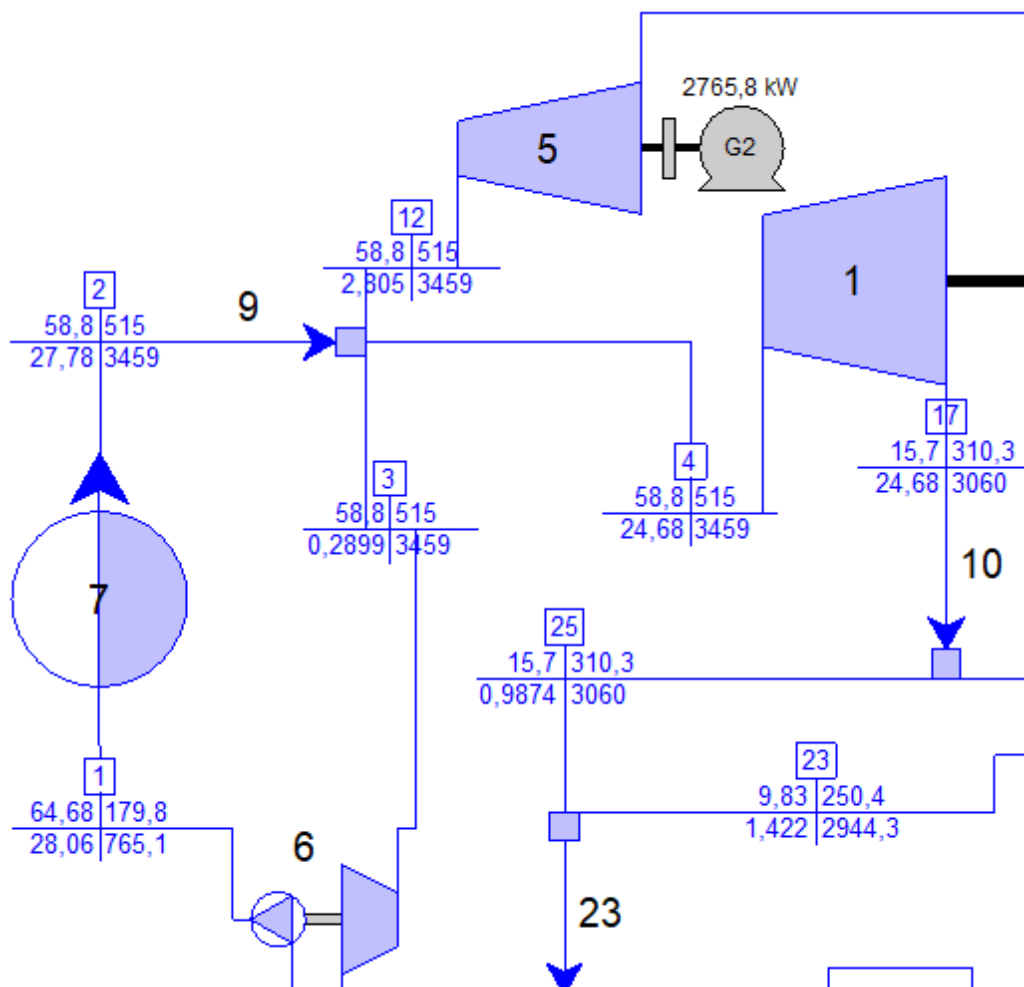
recuperación de condensados (18), en los que se recupera el flujo de vapor de agua principal expandido en la turbina y también el procedente del turbogenerador, y se recirculan hacia la siguiente zona. La segunda parte abarca el calentador de agua con bomba de recirculación (8) y el desaireador (12), donde se recuperan las sangrías procedentes de las distintas etapas de la turbina. La etapa de elevación de la presión corresponde a la turbobomba (6), que eleva la presión y envía el agua al generador de vapor.

Ilustración 36: detalle de la planta de turbinas en la que se muestran, de derecha a izquierda: condensador (13), bomba de recuperación de condensados (18), tanque de compensación (17), calentador de agua con bomba de recirculación (8), desaireador (12) y turbobomba (6).



- **Etapla de vaporización y expansión:** el agua presurizada entra en el generador de vapor (7) donde se realiza el cambio de estado a vapor. Seguidamente, éste se distribuye proporcionalmente a la demanda de vapor en cada una de las tres turbinas a través del divisor de caudal (9). En cada una de las turbinas el vapor se expandiona hasta una presión menor, determinada por la instalación; aportando un trabajo y generando energía mecánica, que se aprovechará para mover: un generador (turbogenerador (5)), la bomba de presurización de agua (turbobomba (6)) o el sistema de propulsión (turbina principal (1, 2, 3 y 4). Cada parte de la turbina principal corresponde a una etapa en la que se realiza una extracción). Esquemáticamente, véase Ilustración 37.

Ilustración 37: detalle del divisor de caudal (9), del turbogenerador (5), de la etapa de alta presión de la turbina principal (1) y de la turbobomba (6).



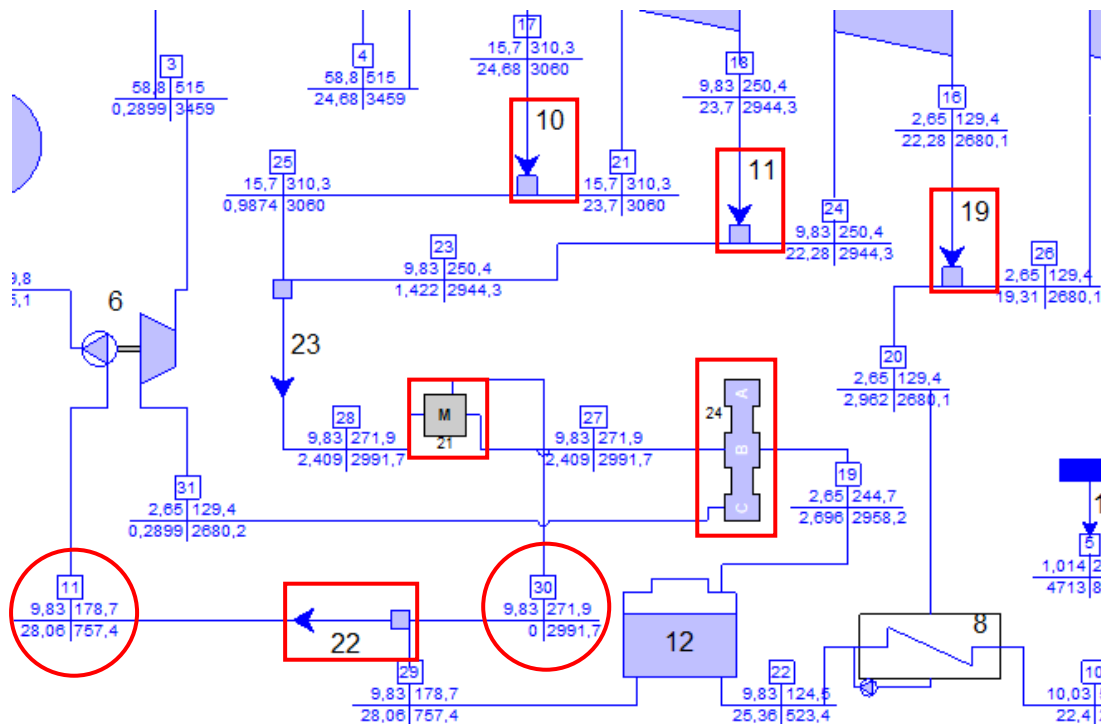
Adicionalmente, para aumentar el rendimiento del ciclo se disponen varias extracciones a lo largo de la turbina principal, representadas por los divisores de flujo (10, 11 y 19). En la Ilustración 38 se muestran las conexiones de cada sangría: las etapas (1 y 2) de la turbina principal conectan sus divisores de caudal (10 y 11) a la etapa que le sucede (2 y 3, respectivamente) y al mezclador (23); y la etapa (3) de la turbina principal, se conecta al divisor (19) y de aquí al calentador de agua con bomba de recirculación (8) y a la etapa (4) de la turbina principal. Entre los divisores de caudal (10 y 11), la turbobomba (6) y el desaireador (12) aparecen unos componentes que han sido necesarios introducir para garantizar que el programa lo pueda calcular y no dé error de computación. Estos elementos son:

- Limitador de caudal (21): proporciona al programa mayor flexibilidad para realizar los cálculos de balances másicos, de manera que no aparezcan

errores. Va unido a la entrada de la turbobomba, 11, pero no conduce caudal a través del conducto 30.

- Mezclador de caudal (22): evita que dé error en el balance másico.
- Puerta lógica (24): garantiza que no se modifique la presión final en la turbobomba (6) que previamente se ha establecido, debido a la diferencia de presiones que presenta con las extracciones.

Ilustración 38: detalle de las sangrías de las turbinas, de los componentes que mejoran los procesos de cálculo y de los conductos 11 y 30.



3.2.2. DATOS INTRODUCIDOS

En la Tabla 4 aparecen los valores introducidos en varios componentes de la planta. Es importante mencionar que las etapas de la turbina principal (1, 2, 3 y 4) van acopladas a un eje único, distinto del turbogenerador (5).

| Componente | Parámetro | Valor y condición |
|------------------------------|-------------------------|-------------------|
| (14) toma de agua | Temperatura | 21°C |
| | Caudal | 4713 kg/s |
| | Prioridad de flujo | Alta |
| (16 y 18) bombas centrífugas | Eficiencia isoentrópica | 80% |

| | | |
|----------------------------------------------------|---------------------------------------------|----------------------------|
| (13) condensador | Especificación | Off-design |
| | Subenfriamiento del condensado | 20°C |
| | UA de diseño | 932,3 kW/m ³ °C |
| | Flujo de agua de condensado máximo | 28,91 kg/s |
| | Flujo A/S máximo | 4713 kg/s |
| | Coefficiente de resistencia al flujo de A/S | 0,4316 |
| | Pérdidas de calor | 0% |
| (17) tanque de compensación | Estado | Idéntico a la entrada |
| (8) calentador intermedio con bomba de circulación | Eficiencia isoentrópica de la bomba | 80% |
| | Eficiencia mecánica de la bomba | 95% |
| (12) desaireador | Presión de diseño | 2,65 bar |
| | Compensación a la entrada y a la salida | 1 m.c.a. |
| (24) Header, Logical | Presión establecida | 2,65 bar |
| (7) generador de vapor | Eficiencia | 97% |
| | Flujo de vapor | 27,78 kg/s |
| | Estado de la salida | Vapor sobrecalentado |
| | Temperatura de salida | 515°C |
| | Caída de presión (dP/P) | 0,1 |
| | Fracción de purga | 0,01 |
| | Prioridad de flujo | Alta |
| (9) divisor | Fracción hacia el turbogenerador | 0,1 |
| | Fracción hacia el grupo para propulsión | 0,88 |
| | Fracción hacia la turbobomba | 0,02 |
| | Prioridad de flujo | Alta |
| (6) turbobomba | Presión de entrada | 58,8 bar |
| | Eficiencia mecánica | 99,75% |

| | | |
|--------------------------------|--------------------------------------------------|-----------------|
| | <i>Título de vapor</i> | <i>100%</i> |
| <i>(5) turbogenerador</i> | <i>Presión de entrada</i> | <i>58,8 bar</i> |
| | <i>Eficiencia mecánica</i> | <i>99,75%</i> |
| | <i>Título de vapor</i> | <i>90%</i> |
| | <i>Velocidad de rotación</i> | <i>1800 rpm</i> |
| | | |
| <i>(1-4) turbina principal</i> | <i>Presión de entrada 1</i> | <i>58,8 bar</i> |
| | <i>Presión de entrada 2</i> | <i>15,7 bar</i> |
| | <i>Presión de entrada 3</i> | <i>9,83 bar</i> |
| | <i>Presión de entrada 4</i> | <i>2,65 bar</i> |
| | <i>Eficiencia mecánica</i> | <i>99,75%</i> |
| | <i>Título de vapor (1-3)</i> | <i>100%</i> |
| | <i>Título de vapor (4)</i> | <i>90%</i> |
| | <i>Velocidad de rotación</i> | <i>3000 rpm</i> |
| <i>(10) mezclador</i> | <i>Fracción destinada a la siguiente turbina</i> | <i>0,96</i> |
| | <i>Prioridad de flujo</i> | <i>Alta</i> |
| <i>(11) mezclador</i> | <i>Fracción destinada a la siguiente turbina</i> | <i>0,94</i> |
| | <i>Prioridad de flujo</i> | <i>Alta</i> |
| <i>(19) mezclador</i> | <i>Fracción destinada a la siguiente turbina</i> | <i>0,91</i> |
| | <i>Prioridad de flujo</i> | <i>Baja</i> |

Tabla 4: valores a introducir para recrear el modelo en el programa.

En la Ilustración 39 se muestran los datos a introducir en el generador de vapor.

Ilustración 39: ventana de edición del generador de vapor y los valores introducidos.

Input Menu - Edit Mode
File GTP/GTM/STM

| Site Menu | Components | Miscellaneous | Gen/Motors |
|--------------------------------------------------------------|------------|---------------|--------------------------|
| Package Boiler [7] | | | 1 - Thermodynamic Design |
| 1. Mode | | | 1 - Thermodynamic Design |
| 2. Design point boiler efficiency (LHV) | | | % 97 |
| 3. Outlet steam flow | | | kg/s 34,8 |
| 4. Outlet steam phase | | | 3 - Superheated vapor |
| 5. Outlet steam temperature | | | C 515 |
| 6. Outlet steam quality | | | NA |
| 7. dP/P across boiler | | | 0,1 |
| 8. Blowdown fraction | | | 0,01 |
| 9. Misc. aux. as fraction of LHV input (>=1 for power in kW) | | | 0,003 |
| 10. Ratio of fuel HHV to LHV | | | 1,1096 |
| 11. Off-design component status | | | NA |
| 12. Off-design boiler delivery pressure set by | | | NA |
| 13. Off-design set point pressure | | | bar NA |
| 14. Nominal load | | | Mw NA |
| 15. Nominal efficiency (LHV) | | | % NA |
| 16. Flow priority | | | Strong |
| 17. Fuel LHV price | | | USD/GJ 3,79144 |
| 18. Off-design efficiency method | | | NA |

Por otro lado, en la Ilustración 40 se muestran los datos de la turbobomba, y en la Ilustración 41, los correspondientes al calentador de agua con bomba de recirculación.

Ilustración 40: ventana de edición de la turbobomba. Los datos corresponden a la bomba.

Input Menu - Edit Mode
File GTP/GTM/STM

| Site Menu | Components | Miscellaneous | Gen/Motors |
|-------------------------------------------------------|------------|---------------|--------------------------|
| ST-Driven Pump [6] | | | 1 - Thermodynamic Design |
| 1. Mode | | | 1 - Thermodynamic Design |
| 2. Nominal unit capacity | | | % 100 |
| 3. Number of existing units | | | 1 |
| 4. Number of operating units | | | 1 |
| 5. Off-design performance type | | | NA |
| 6. Pump design point overall pressure rise | | | bar 54,7519 |
| 7. Pump head margin | | | % -5,6 |
| 8. Pump flow margin | | | % 10 |
| 9. Pump nominal isentropic efficiency | | | % 80 |
| 10. Design point RPM | | | 3000 |
| 11. Current RPM | | | 3000 |
| 12. Speed type | | | 1 - Variable RPM |
| 13. Mechanical efficiency | | | % 97 |
| 14. Nominal RPM for off-design pump curve | | | NA |
| 15. Nominal mass flow for off-design pump curve | | | kg/s NA |
| 16. Nominal pressure rise for off-design pump curve | | | bar NA |
| 17. Off-design control valve dP | | | bar NA |
| 18. Mechanical loss | | | kW NA |
| 19. Design point pump inlet density | | | kg/m^3 NA |
| 20. Steam turbine model selection | | | THERMOFLEX turbine model |
| 21. Simple turbine inlet pressure | | | bar NA |
| 22. Simple turbine design point isentropic efficiency | | | % NA |
| 23. Simple turbine design point flow | | | kg/s NA |

Ilustración 41: ventana de edición del calentador de agua con bomba de recirculación y sus parámetros.

Input Menu - Edit Mode
File GTP/GTM/STM

| Site Menu | Components | Miscellaneous | Gen/Motors |
|------------------------------------------------------|------------|---------------|--------------------------------------------------|
| Feedwater Heater w/ Pump [8] | | | |
| 1. Mode | | | 0 - Design |
| 2. FW temperature mode | | | 1 - FW exit temperature dictated by steam source |
| 3. Design point FW temperature @ heater exit | | | 123.861 |
| 4. Design point terminal difference | | | 5.5 |
| 5. Include drain cooler | | | 0 - No |
| 6. Design point drain cooler approach | | | NA |
| 7. Include desuperheater | | | 0 - No |
| 8. Design point residual superheat | | | NA |
| 9. Design point minimum pinch | | | 2.778 |
| 10. Design point dP/P across feedwater-side | | | 0.02 |
| 11. Design point shell pressure | | | 2.65001 |
| 12. Off-design status | | | NA |
| 13. FW temperature mode at off-design | | | NA |
| 14. FW temperature @ heater exit | | | NA |
| 15. Design point steam-side thermal res./total res. | | | NA |
| 16. Design point water-side thermal res./total res. | | | NA |
| 17. Design point tube wall & fouling res./total res. | | | NA |
| 18. Design point steam mass flow | | | kg/s |
| 19. Design point water mass flow | | | kg/s |
| 20. Design point UA of condensing section | | | kw/C |
| 21. Design point UA of drain cooling section | | | kw/C |
| 22. Design point UA of desuperheating section | | | kw/C |
| 23. Water-side flow resistance coefficient | | | m ⁻⁴ |
| 24. Correction factor for overall h.t.c. | | | NA |
| 25. Scaling exponent for steam-side h.t.c. | | | NA |
| 26. Scaling exponent for water-side h.t.c. | | | NA |
| 27. Pump isentropic efficiency | | | % |
| 28. Pump mechanical/motor efficiency | | | % |

En cuanto al condensador, es necesario cambiar del modo “Thermodynamic Design” a “Off-design” durante el proceso de ejecución de la simulación. Esto será posible una vez se haya realizado la simulación por primera vez en el primer modo. Para tal caso, habrá que establecer los valores iniciales que se muestran en la Ilustración 42, además de cambiar la temperatura de agua de la toma de mar a 27°C (estas son las condiciones de referencia según el manual de la planta). Posteriormente se establecerá a 21°C y será necesario seguir las indicaciones que se muestran en la Ilustración 43 y la Ilustración 44.

Ilustración 42: valores a introducir en el condensador antes de ejecutar la simulación por primera vez.

ral Condenser [13] Thermodynamic Design

Normalized heat loss dQ/Q %

Minimum pinch °C

Condenser pressure bar

Coolant outlet state:
 Temperature °C
 Quality
☒ Subcooled
☐ Saturated
☐ Superheated

Coolant dP/P %

Condensate subcooling °C

Water head to condensate outlet m H2O

Ilustración 43: ventana de edición del condensador en modo “Off-design” y los parámetros iniciales que se deben introducir.

Input Menu - Edit Mode
File GTP/GTM/STM

Site Menu **Components** Miscellaneous Gen/Motors

General Condenser [13] Off-design

Off-Design Inputs

Coolant Flow Control Mode:
 Specify coolant flow %
 Coolant flow as % of design value %
 Maximum coolant flow %
 Design coolant flow kg/s

Design point UA kW/°C

Normalized heat loss dQ/Q %

Coolant outlet state:
 Temperature °C
 Quality
☐ Subcooled
☐ Saturated
☐ Superheated

Coolant flow resistance coefficient m⁻⁴

Condensate subcooling °C

Water head to condensate outlet m H2O

Ilustración 44: ventana de edición secundaria (“Other inputs”) del condensador en modo “Off-design” y los valores a introducir. De aquí solo sería necesario modificar la casilla 13, estableciendo el valor a 4713 kg/s, aunque se recomienda modificar las casillas 1 y 2 también.

Input Menu - Edit Mode

File GTP/GTM/STM

Site Menu Components Miscellaneous Gen/Motors

General Condenser [13]

Off-Design Inputs

| | | |
|-----------------------------------------------------------------------|-------|------|
| 1. Design point condensate thermal resistance / total resistance | 0,15 | |
| 2. Design point coolant thermal resistance / total resistance | 0,4 | |
| 3. Design point tube wall_fouling resistance / total resistance | 0,45 | |
| 4. Correction factor for overall h.t.c. | 1 | |
| 5. Design point condensate flow | 28,91 | kg/s |
| 6. Design point condensate mean temperature | 88,5 | C |
| 7. Design point condensate mean pressure | 1,048 | bar |
| 8. Design point condensate molecular weight | 18,02 | |
| 9. Scaling exponent for condensate h.t.c with condensate flow | 0,8 | |
| 10. Scaling exponent for condensate h.t.c with condensate temperature | 0 | |
| 11. Scaling exponent for condensate h.t.c with condensate pressure | 0 | |
| 12. Scaling exponent for condensate h.t.c with molecular weight | 0 | |
| 13. Design point coolant flow | 4713 | kg/s |
| 14. Design point coolant mean temperature | 29,5 | C |
| 15. Design point coolant mean pressure | 1,024 | bar |
| 16. Design point coolant molecular weight | 18,02 | |
| 17. Scaling exponent for coolant h.t.c with coolant flow | 0,72 | |
| 18. Scaling exponent for coolant h.t.c with coolant temperature | 0 | |
| 19. Scaling exponent for coolant h.t.c with coolant pressure | 0 | |
| 20. Scaling exponent for coolant h.t.c with molecular weight | 0 | |

3.2.3. VALORES DE REFERENCIA

Con el circuito descrito y los datos introducidos se han obtenido los parámetros de funcionamiento de referencia. Estos datos se recogen en la Tabla 5:

| Sumario de planta | Unidad | Valor |
|--------------------------------------------------|---------------|--------------|
| <i>Presión atmosférica</i> | <i>bar</i> | <i>1,013</i> |
| Temperatura del medio | °C | 15 |
| <i>Humedad relativa del ambiente</i> | <i>%</i> | <i>60</i> |
| <i>Temperatura ambiente del bulbo húmedo</i> | <i>°C</i> | <i>10,82</i> |
| Potencia neta | kW | 25437 |
| <i>Equipos auxiliares</i> | <i>kW</i> | <i>556,4</i> |
| <i>Pérdidas del transformador</i> | <i>kW</i> | <i>130,6</i> |
| Potencia total | kW | 26124 |
| Rendimiento neto considerando un PCI | % | 32,92 |
| <i>Rendimiento neto considerando un PCS</i> | <i>%</i> | <i>29,67</i> |
| <i>Entrada de combustible gaseoso neto (PCI)</i> | <i>kW</i> | <i>77273</i> |
| <i>Entrada de combustible gaseoso neto (PCS)</i> | <i>kW</i> | <i>85742</i> |

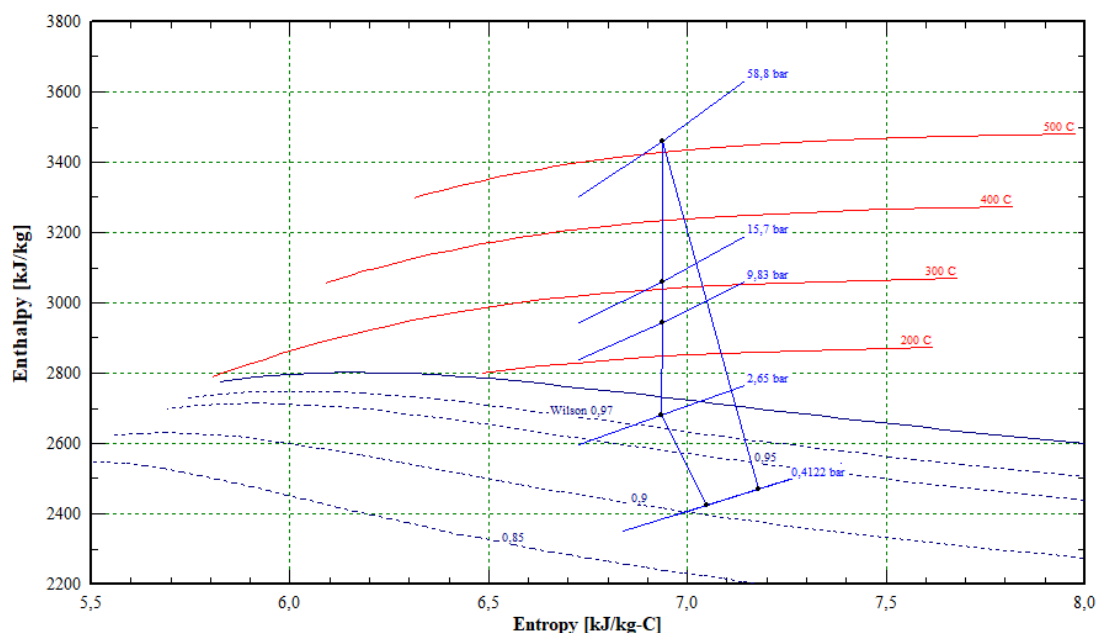
Tabla 5: resumen de la planta con sistema de turbinas de vapor.

En la Tabla 6 se recogen algunos valores concretos de generación y consumo de potencia, dado que la anterior tabla solo hace mención como valores generales de la planta en conjunto, y no individualmente.

| Elementos de generación y consumo | Unidad | Valor |
|--------------------------------------------------------------|---------------|----------------|
| Turbina principal | kW | 23358 |
| Turbogenerador | kW | 2765,8 |
| <i>Calentador intermedio con bomba de circulación</i> | <i>kW</i> | <i>-2,993</i> |
| <i>Bomba [16]</i> | <i>kW</i> | <i>-31,46</i> |
| <i>Bomba [18]</i> | <i>kW</i> | <i>-28,89</i> |
| <i>Equipos del generador de vapor (ventiladores y otros)</i> | <i>kW</i> | <i>-231,8</i> |
| <i>Otros equipos auxiliares específicos</i> | <i>kW</i> | <i>-261,2</i> |
| Equipos auxiliares | kW | -556,4* |
| Pérdidas del transformador | kW | -130,6 |

Tabla 6: valores de consumo y generación de potencia de la planta de cada componente.
*Suma de los 5 consumidores de la planta: “Calentador intermedio con bomba de circulación”, “Bomba [16]”, “Bomba [18]”, “Equipos del generador de vapor (ventiladores y otros)” y “Otros equipos auxiliares específicos”.

En la Gráfica 1 se muestra la evolución del flujo de vapor de agua, tanto en la turbina principal como en el turbogenerador.

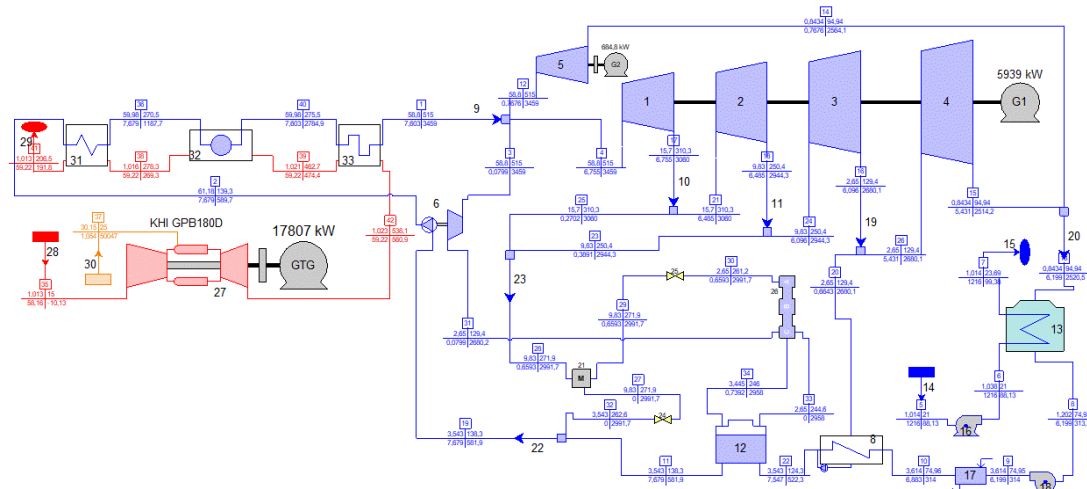


Gráfica 1: evolución del flujo de vapor a lo largo de la turbina principal (representada por 4 etapas de evolución, línea izquierda) y del turbogenerador (representada por una única pendiente, línea derecha).

3.3. ANÁLISIS DE LA PLANTA CON SISTEMA COGAS

3.3.1. ESQUEMA DE MONTAJE

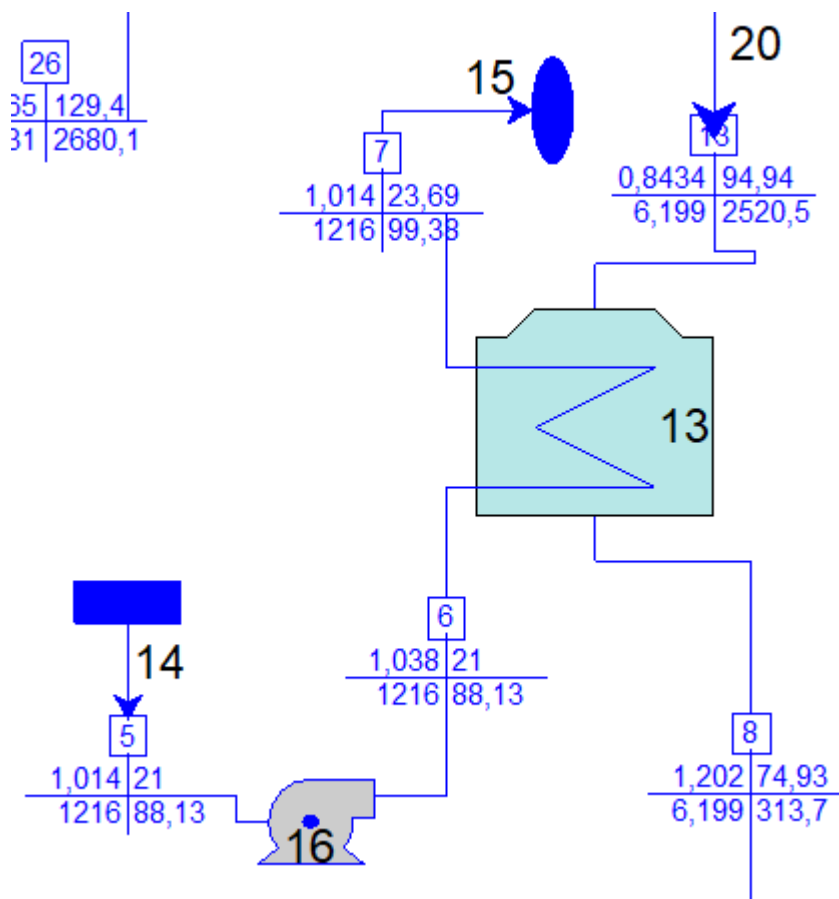
Ilustración 45: esquema empleado para representar la planta con sistema COGAS.



La planta se puede dividir en 4 partes, de las cuales, las 2 primeras partes se han tratado en el anterior apartado:

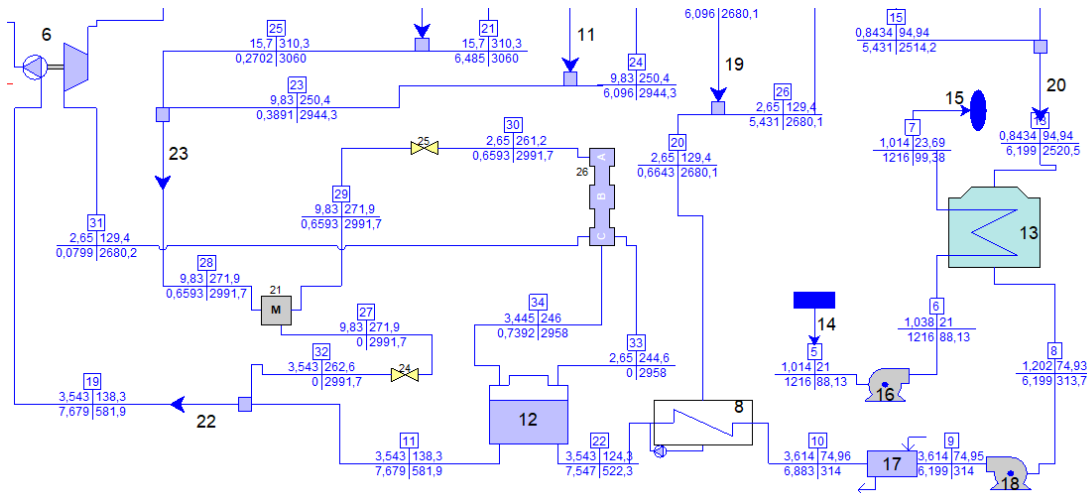
- **Circuito de A/S:** compuesto por una toma de agua (14) y una bomba centrífuga (16) que proporciona A/S al condensador (13). El circuito abierto termina en un sumidero de agua (15).

Ilustración 46: detalle del circuito de A/S del condensador.



- **Etapas de condensación, recuperación de las extracciones y elevación de la presión:** la etapa de condensación comprende el condensador (13) y la bomba de recuperación de condensados (18), en los que se recupera el flujo de vapor de agua procedente de los turbogeneradores, y se recirculan hacia la siguiente zona. La segunda parte abarca el calentador de agua con bomba de recirculación (8) y el desaireador (12), donde se recuperan las sangrías procedentes de las distintas etapas de la turbina. La etapa de elevación de la presión corresponde a la turbobomba (6), que eleva la presión y envía el agua hacia los recuperadores de calor.

Ilustración 47: detalle de la planta, en la que se muestran, de derecha a izquierda: condensador (13), bomba de recuperación de condensados (18), tanque de compensación (17), calentador de agua con bomba de recirculación (8), desaireador (12) y turbobomba (6).



- **Generación de vapor y turbina de gas:** el agua presurizada entra en el generador de vapor, que consiste en un recuperador de calor que se divide en 3 zonas: calentador de agua (31), evaporador (32) y sobrecalentador (33). Cada uno de estos cumple con una función: el primer intercambiador de calor lleva el agua hasta la línea de saturación de líquido, el segundo produce el cambio de fase a vapor hasta la línea de saturación de vapor, y el tercero eleva la temperatura por encima de la línea de saturación de vapor. El calor se obtiene mediante los gases de exhaustación de la turbina de gas (27). La turbina de gas es el modelo *KHI GPB180D*, un modelo del fabricante *Kawasaki Heavy Industries*. Este modelo es ideal para suministrar electricidad a través del generador, y además, permite aprovechar los gases de salida para aplicaciones de cogeneración, con valores de hasta el 84% de eficiencia; o para nuestro caso, que es de ciclo combinado, con valores del 50% de eficiencia, aproximadamente [108]–[111].

Ilustración 48: sistema de generación de vapor de la planta a través de un recuperador-intercambiador de calor; y turbina de gas, empleada para producir energía eléctrica y térmica.

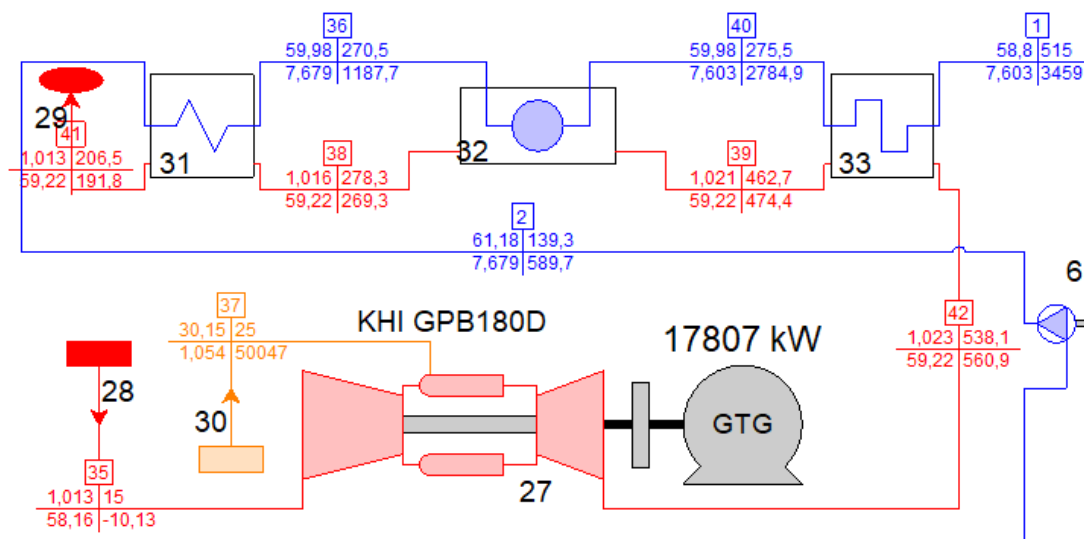
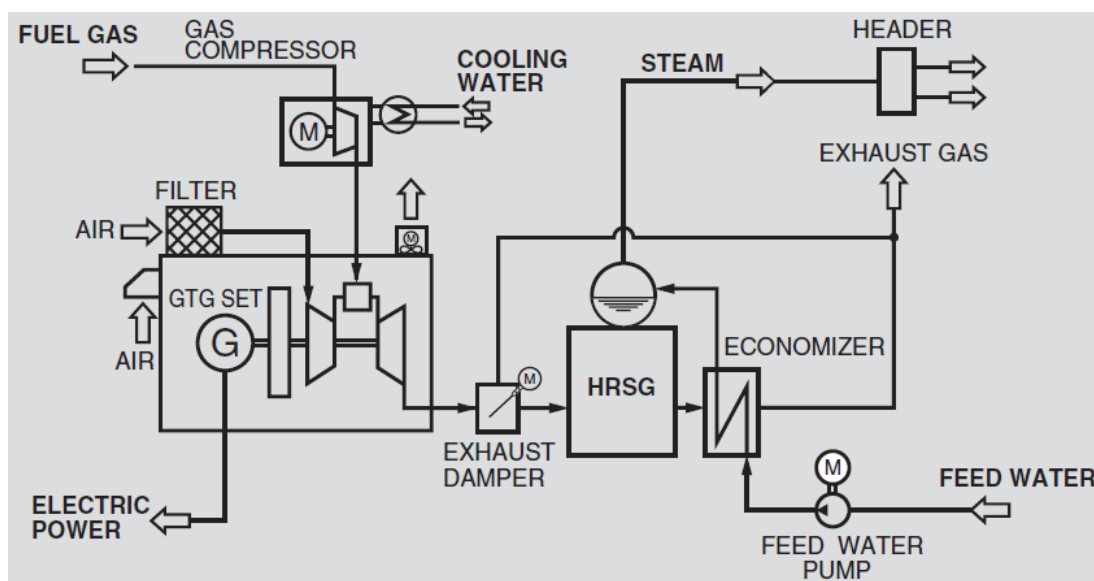


Ilustración 49: diagrama de la turbina de gas modelo GPB180D.



- **Expansión del vapor en los turbogeneradores y la turbobomba:** a su salida, el vapor se distribuye proporcionalmente en cada una de las tres turbinas a través del divisor de caudal (9). En cada una de las turbinas el vapor se expande hasta una presión menor, determinada por la instalación; aportando un trabajo y generando energía mecánica, que se aprovechará para mover: un generador (turbogenerador (5)), la bomba de presurización de agua (turbobomba (6)) o un turbogenerador de mayores dimensiones (turbina principal (1, 2, 3 y 4). Cada parte de esta corresponde a una etapa en la que se realiza una extracción).

Ilustración 50: detalle del divisor de caudal (9), del turbogenerador (5), de la etapa de alta presión del turbogenerador principal (1) y de la turbobomba (6). Los circuitos de turbinas de vapor y COGAS coinciden en el diseño mayoritariamente porque se ha creado el modelo COGAS a partir de los componentes disponibles del otro modelo, siendo necesario modificar el generador de vapor, los datos introducidos y varios componentes que hacen posible que funcione correctamente la modelización, los cuales se explicarán a continuación.

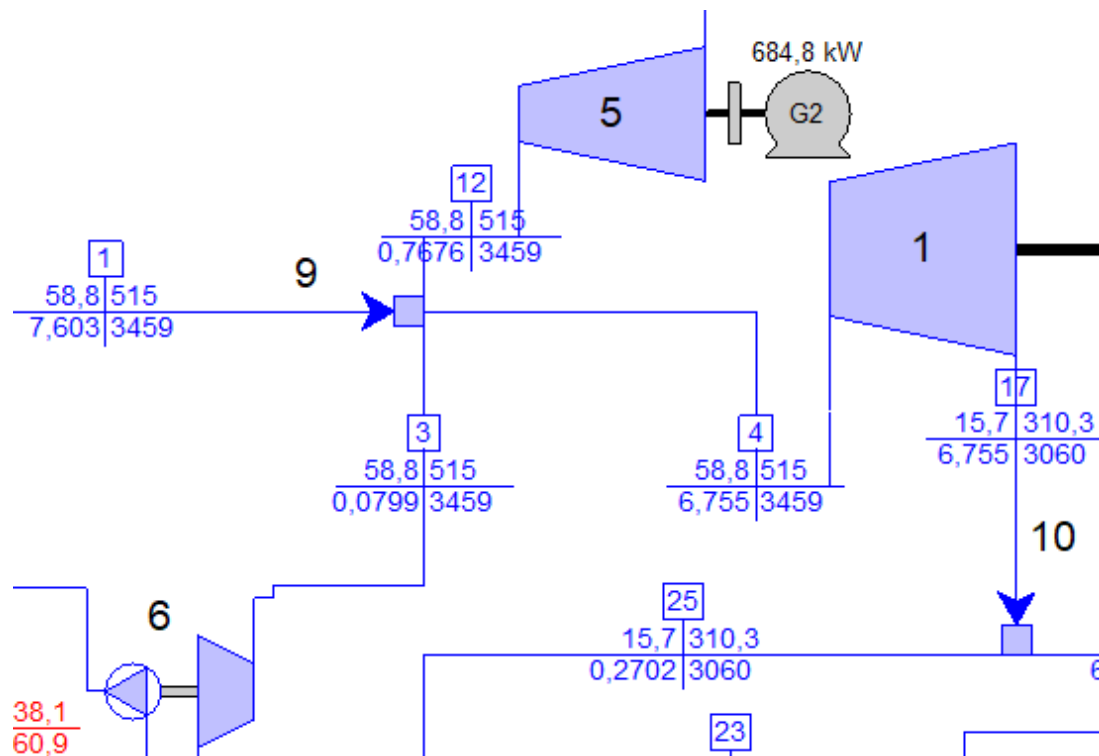
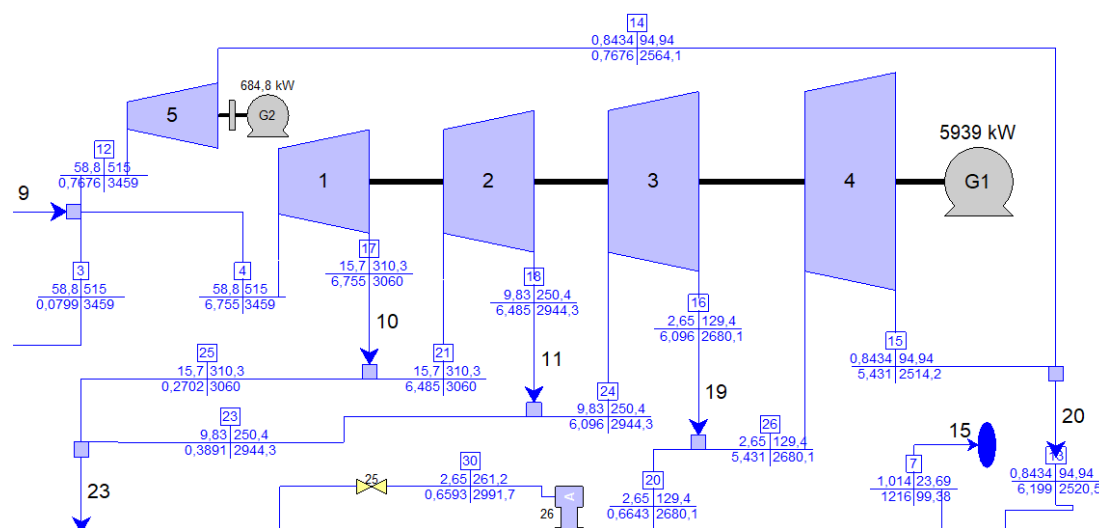


Ilustración 51: etapas del turbogenerador principal (1, 2, 3 y 4) y del turbogenerador (5), además de las extracciones llevadas a cabo al final de cada etapa.

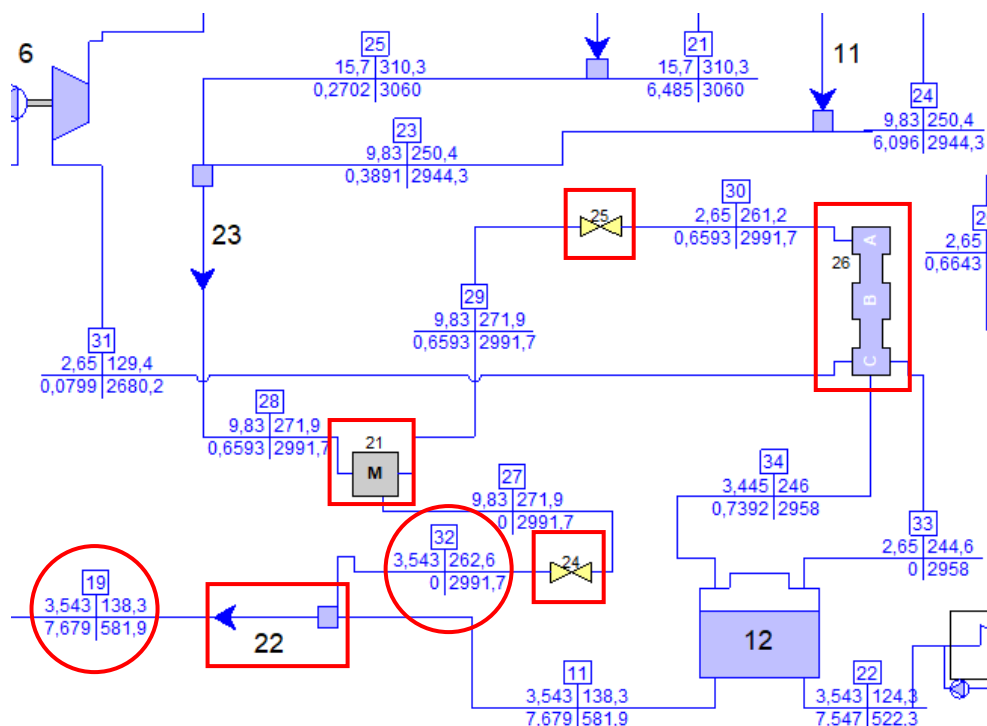


Adicionalmente, para aumentar el rendimiento del ciclo se disponen varias extracciones a lo largo de la turbina principal, tal y como se muestra en la Ilustración 51; representadas por los divisores de flujo (10, 11 y 19). En la Ilustración 52 aparecen

unos componentes adicionales que han sido necesarios introducir para garantizar que el programa lo pueda calcular y no dé error de computación. Estos elementos son:

- Limitador de caudal (21): proporciona al programa mayor flexibilidad para realizar los cálculos de balances másicos, de manera que no aparezcan errores. Va unido a la entrada de la turbobomba, 19, pero no conduce caudal a través del conducto 32.
- Mezclador de caudal (22): evita que dé error en el balance másico.
- Válvulas reductoras de presión (24 y 25): incorporan un valor de presión prioritario, de manera que fuerza al programa a trabajar con esta presión, y no con otro valor que reconsidere durante las operaciones.
- Puerta lógica (26): garantiza que no se modifique la presión final en la turbobomba (6) que previamente se ha establecido, debido a la diferencia de presiones que presenta con las extracciones.

Ilustración 52: detalle de los componentes que mejoran el procesamiento de los cálculos y de los conductos 19 y 32.



3.3.2. DATOS INTRODUCIDOS

En la Tabla 7 aparecen los datos a introducir en cada componente.

| Componente | Parámetro | Valor y condición |
|----------------------------------------------------|-----------------------------------------|------------------------------------|
| (14) toma de agua | Temperatura | 21°C |
| | Caudal | 1216 kg/s |
| | Prioridad de flujo | Alta |
| (16 y 18) bombas centrífugas | Eficiencia isoentrópica | 80% |
| (13) condensador | Especificación | Off-design |
| | Subenfriamiento del condensado | 20°C |
| | UA de diseño | 189,8 kW/m ³ °C |
| | Flujo de agua de condensado máximo | 6,231 kg/s |
| | Flujo A/S máximo | 1216 kg/s |
| | Caída de presión en el lado A/S | 3,351 |
| (17) tanque de compensación | Pérdidas de calor | 0% |
| | Estado | Idéntico a la entrada |
| (8) calentador intermedio con bomba de circulación | Eficiencia isoentrópica de la bomba | 80% |
| | Eficiencia mecánica de la bomba | 95% |
| (12) desaireador | Presión de diseño | 2,65 bar |
| | Compensación a la entrada y a la salida | 1 m.c.a. |
| (26) Header, Logical | Presión establecida | 2,65 bar |
| (24 y 25) válvulas | Presión de entrada | 2,65 bar |
| (32) evaporador | Producción de vapor | >8 kg/s* |
| (33) sobrecalentador | Temperatura de salida | 515°C |
| (27) turbina de gas | Modelo | ID=371; KHI GPB180D; LHV=34% |
| (9) divisor | Fracción hacia el turbogenerador | 0,1 |
| | Fracción hacia el grupo para propulsión | 0,88 |
| | Fracción hacia la turbobomba | 0,02 |

| | | |
|---------------------------------|--------------------------------------------------|-----------------|
| | <i>Prioridad de flujo</i> | <i>Alta</i> |
| (6) turbobomba | <i>Presión de entrada</i> | <i>58,8 bar</i> |
| | <i>Eficiencia mecánica</i> | <i>99,75%</i> |
| | <i>Título de vapor</i> | <i>100%</i> |
| (5) turbogenerador | <i>Presión de entrada</i> | <i>58,8 bar</i> |
| | <i>Eficiencia mecánica</i> | <i>99,75%</i> |
| | <i>Título de vapor</i> | <i>90%</i> |
| | <i>Velocidad de rotación</i> | <i>1800 rpm</i> |
| (1-4) turbina de vapor primaria | <i>Presión de entrada 1</i> | <i>58,8 bar</i> |
| | <i>Presión de entrada 2</i> | <i>15,7 bar</i> |
| | <i>Presión de entrada 3</i> | <i>9,83 bar</i> |
| | <i>Presión de entrada 4</i> | <i>2,65 bar</i> |
| | <i>Eficiencia mecánica</i> | <i>99,75%</i> |
| | <i>Título de vapor (1-3)</i> | <i>100%</i> |
| | <i>Título de vapor (4)</i> | <i>90%</i> |
| | <i>Velocidad de rotación</i> | <i>3000 rpm</i> |
| (10) mezclador | <i>Fracción destinada a la siguiente turbina</i> | <i>0,96</i> |
| | <i>Prioridad de flujo</i> | <i>Alta</i> |
| (11) mezclador | <i>Fracción destinada a la siguiente turbina</i> | <i>0,94</i> |
| | <i>Prioridad de flujo</i> | <i>Alta</i> |
| (19) mezclador | <i>Fracción destinada a la siguiente turbina</i> | <i>0,91</i> |
| | <i>Prioridad de flujo</i> | <i>Baja</i> |

Tabla 7: parámetros a introducir para recrear el modelo en el programa. *El flujo másico definitivo lo establecerá el programa, pero es necesario indicarle una cantidad mayor para que tome el valor máximo posible.

3.3.3. VALORES DE REFERENCIA

Con el circuito definido y los datos introducidos se han obtenido los parámetros de funcionamiento de referencia. Estos datos se recogen en la Tabla 8:

| <i>Sumario de planta</i> | <i>Unidad</i> | <i>Valor</i> |
|----------------------------------------------------|------------------|---------------------|
| <i>Presión atmosférica</i> | <i>bar</i> | <i>1,013</i> |
| <i>Temperatura del medio</i> | <i>°C</i> | <i>15</i> |
| <i>Humedad relativa del ambiente</i> | <i>%</i> | <i>60</i> |
| <i>Temperatura ambiente del bulbo húmedo</i> | <i>°C</i> | <i>10,82</i> |
| <i>Potencia neta</i> | <i>kW</i> | <i>24022</i> |
| <i>Equipos auxiliares</i> | <i>kW</i> | <i>-287,2</i> |
| <i>Pérdidas del transformador</i> | <i>kW</i> | <i>-122,2</i> |
| <i>Potencia total</i> | <i>kW</i> | <i>24431</i> |
| <i>Rendimiento neto considerando un PCI</i> | <i>%</i> | <i>45,52</i> |
| <i>Rendimiento neto considerando un PCS</i> | <i>%</i> | <i>41,02</i> |
| <i>Entrada de combustible gaseoso neto (PCI)</i> | <i>kW</i> | <i>52770</i> |
| <i>Entrada de combustible gaseoso neto (PCS)</i> | <i>kW</i> | <i>58554</i> |

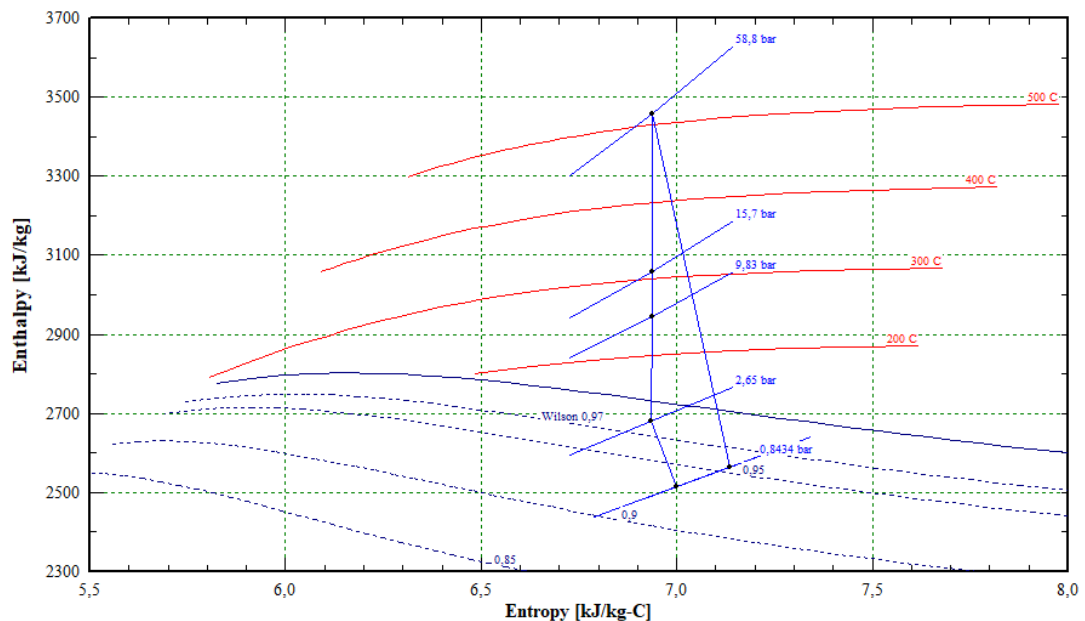
Tabla 8: resumen de la planta con sistema COGAS.

En la Tabla 9 se recogen los valores de generación y consumo de potencia, dado que la anterior tabla solo hace mención como valores generales de la planta en conjunto, y no individualmente.

| <i>Elementos de generación y consumo</i> | <i>Unidad</i> | <i>Valor</i> |
|-------------------------------------------------------|------------------|-----------------------|
| <i>Turbina de gas</i> | <i>kW</i> | <i>17807</i> |
| <i>Turbogenerador principal</i> | <i>kW</i> | <i>5939</i> |
| <i>Turbogenerador auxiliar</i> | <i>kW</i> | <i>684,8</i> |
| <i>Equipos auxiliares de la turbina de gas</i> | <i>kW</i> | <i>-36,09</i> |
| <i>Calentador intermedio con bomba de circulación</i> | <i>kW</i> | <i>-0,08349</i> |
| <i>Bomba [16]</i> | <i>kW</i> | <i>-4,408</i> |
| <i>Bomba [18]</i> | <i>kW</i> | <i>-2,291</i> |
| <i>Otros equipos auxiliares específicos</i> | <i>kW</i> | <i>-244,3</i> |
| <i>Equipos auxiliares</i> | <i>kW</i> | <i>-287,2*</i> |
| <i>Pérdidas del transformador</i> | <i>kW</i> | <i>-122,2</i> |

Tabla 9: valores de consumo y generación de potencia de la planta de cada componente.
*Suma de los 5 consumidores de la planta: “Equipos auxiliares de la turbina de gas”, “Calentador intermedio con bomba de circulación”, “Bomba [16]”, “Bomba [18]” y “Otros equipos auxiliares específicos”.

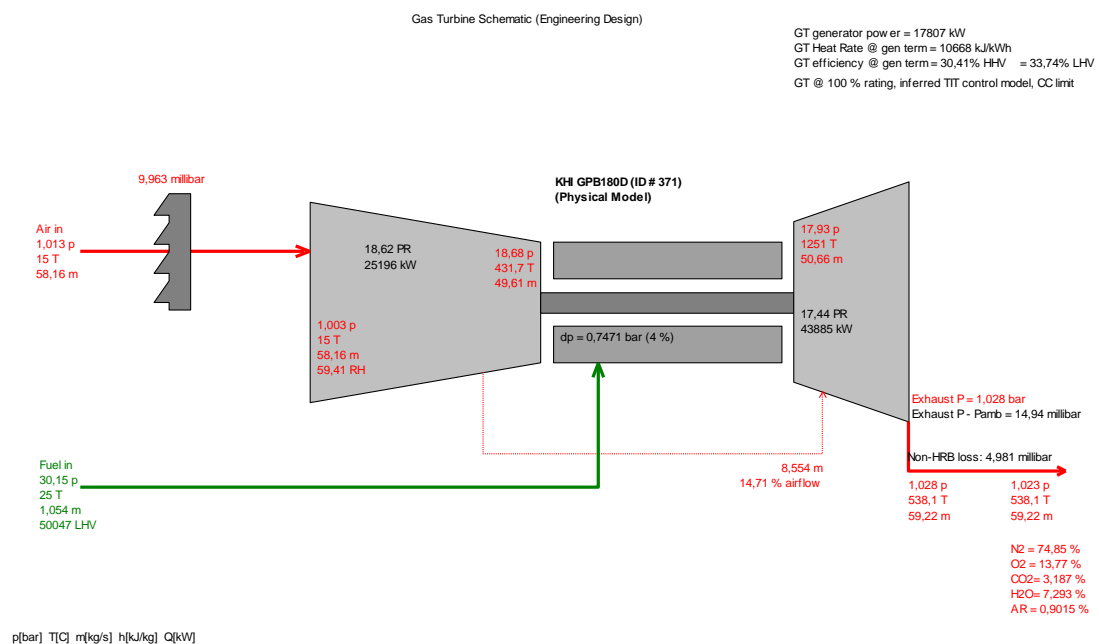
En la Gráfica 2 aparece el diagrama de Mollier, en el que se encuentran representados la evolución del vapor de agua a lo largo de las turbinas de vapor.



Gráfica 2: diagrama de Mollier del turbogenerador principal (izquierda) y del turbogenerador (5) (derecha) de la planta de turbinas de vapor del sistema COGAS.

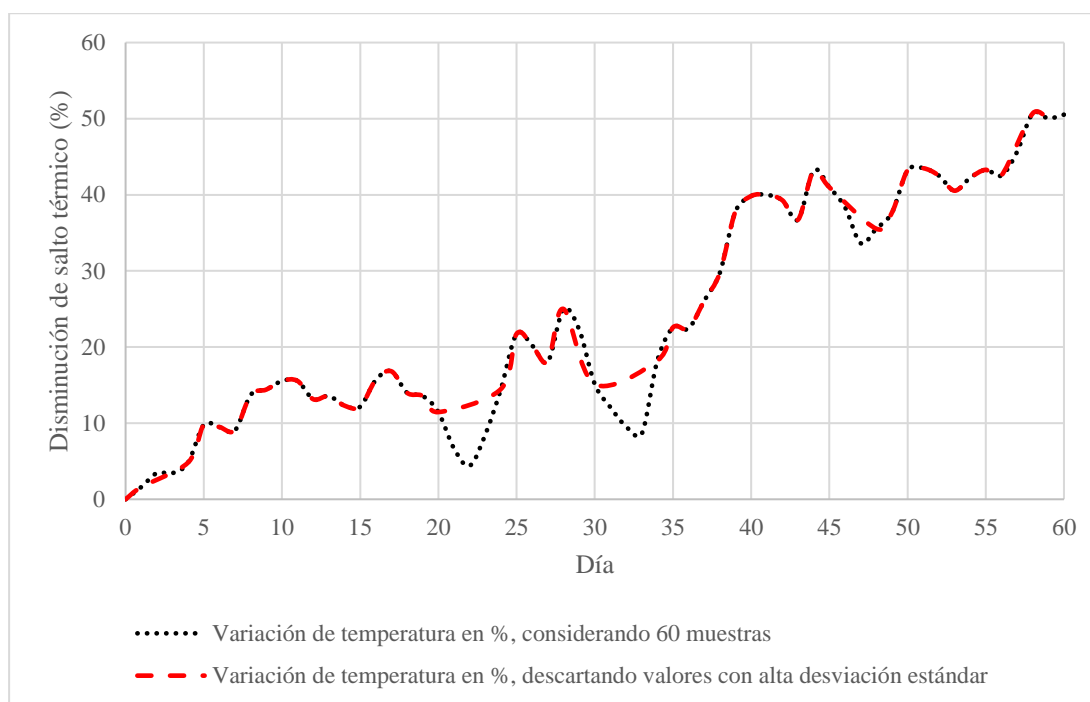
Adicionalmente, el programa reúne un esquema, como en el modelo de la Ilustración 53, en el que se detallan los parámetros de funcionamiento de la turbina de gas.

Ilustración 53: parámetros de funcionamiento de la turbina de gas.

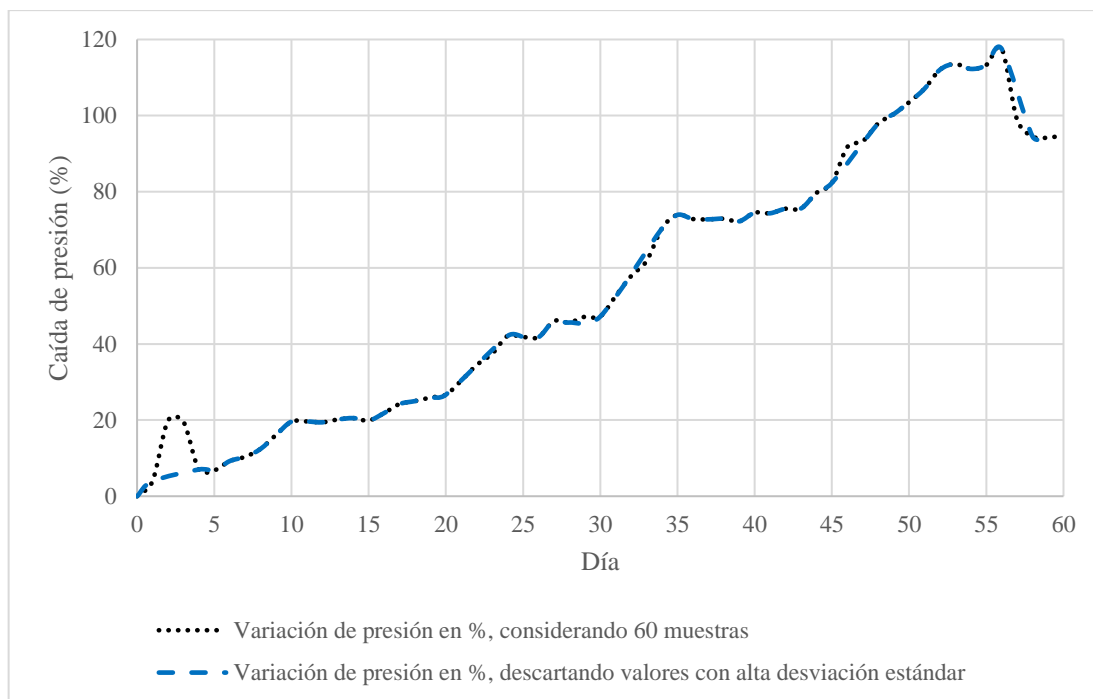


3.4. EXTRAPOLACIÓN DE DATOS DE LA PLANTA PILOTO DE BIOFOULING

Para simular el crecimiento de biofouling en cada una de las plantas de manera proporcional, ha sido necesario emplear un registro de datos de mediciones de la planta piloto, llevado a cabo durante 60 días en los meses de agosto y septiembre de 2014. Dichos datos han sido facilitados por el Departamento de Ciencias y Técnicas de la Navegación y Construcción Naval de la ETS de Náutica de la Universidad de Cantabria.



Gráfica 3: variación de temperatura (en %) en función del tiempo (expresado en días) del promedio diario del registro de muestras obtenido de la planta piloto.



Gráfica 4: variación de presión (en %) en función del tiempo (expresado en días) del promedio diario del registro de muestras obtenido de la planta piloto.

Dado que este registro contiene datos medidos con una frecuencia de muestreo de 1 hora durante 60 días, la cantidad de datos obtenida (1440 muestras) resulta demasiado grande como para analizarla una por una, de manera que, para simplificar el análisis se ha optado por:

1. De los datos ofrecidos en cada muestra, se han tomado los parámetros de:
 - a. Temperatura del agua salada (A/S) a la entrada y a la salida, obteniendo la variación de temperatura en el lado de A/S del intercambiador de calor; y
 - b. Variación de presión en el lado de A/S entre la entrada y la salida en el intercambiador de calor.
2. Realizar el promedio diario (cada 24h) para cada uno de estos datos (presión y temperatura). En este punto, el número de muestras se reduce de 1440 a 60. Para cada promedio hay que evaluar su desviación estándar, pues existen variaciones a lo largo de un mismo día, debidas a varios factores: la hora de la toma de datos, la meteorología, la precisión de los aparatos de medición, la fiabilidad de los equipos... Si la desviación estándar es alta, ese valor deberá descartarse. En la Gráfica 3 y en la Gráfica 4 aparecen los promedios diarios de todas las muestras durante 60 días, relativos a temperatura y presión, respectivamente, expresándolos como incrementos porcentuales respecto al primer día. En las gráficas aparecen



dos evoluciones: una de estas evoluciones incluye todos los promedios obtenidos (línea de puntos negros), y la otra evolución omite aquellos valores cuyas desviaciones estándar resultaron ser altas.

3. Calcular el incremento porcentual de los valores de presión ($\Delta p\%$) y temperatura ($\Delta T\%$) de cada uno de los 60 promedios diarios de muestras, tomando como referencia el promedio del primer día. Corresponde con los valores representados en la Gráfica 3 y en la Gráfica 4.
4. De $\Delta p\%$ y $\Delta T\%$ seleccionamos 12 valores, más el valor inicial, dejando intervalos similares entre ellos. Así pues, los valores empleados para la simulación en cada planta corresponden a los días: 0, 7, 14, 18, 24, 27, 35, 38, 43, 45, 50, 55 y 59. Los valores seleccionados se encuentran en la Tabla 10, la cual aparece más adelante.
5. Convertir proporcionalmente a las unidades que emplean los diversos componentes del programa para la simulación. Esto es debido a que es necesario adaptar los valores que se han obtenido a otros con los que el programa pueda trabajar. En otras palabras, los valores porcentuales deben transformarse en unidades de temperatura, coeficiente de resistencia por fouling y capacidad de transferencia de calor global. Para ello se han empleado las referencias que el programa ofrece, tales como la caída de presión sucedida a lo largo del intercambiador de calor o la pérdida de transferencia de calor en el intercambiador de calor; y también se ha tomado como referencia la temperatura máxima a la salida del compresor de la turbosoplante, para el caso de la planta IFEP (ofrecida por el fabricante). Todo esto se sintetiza en forma de datos en la Tabla 10.

| Día | ¹ ΔT A/S (%) | ¹ Δp A/S (%) | ² T entrada A/S (°C) | ³ T salida Heat adder (°C) | ⁴ Coefficiente de resistencia debido al fouling (m^{-4}) | | ⁵ UA ($kW/m^3°C$) | |
|-----|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|--------------|--------------------------------|--------------|
| | | | | | Planta turbinas | Planta COGAS | Planta turbinas | Planta COGAS |
| 0 | 0 | 0 | 21,0 | 55 | 0 | 0 | 932,3 | 189,8 |
| 7 | 9,1 | 10,4 | 22,9 | 60,0 | 0,89 | 6,94 | 847,8 | 172,6 |
| 14 | 12,3 | 20,5 | 23,6 | 61,8 | 1,77 | 13,75 | 817,6 | 166,4 |
| 18 | 14,0 | 25,0 | 23,9 | 62,7 | 2,16 | 16,75 | 801,9 | 163,2 |
| 24 | 14,5 | 42,1 | 24,0 | 63,0 | 3,63 | 28,22 | 797,3 | 162,3 |
| 27 | 18,1 | 46,0 | 24,8 | 64,9 | 3,97 | 30,85 | 763,8 | 155,5 |
| 35 | 22,6 | 73,9 | 25,7 | 67,4 | 6,38 | 49,54 | 721,8 | 146,9 |
| 38 | 29,8 | 72,9 | 27,3 | 71,4 | 6,29 | 48,86 | 654,7 | 133,3 |
| 43 | 36,7 | 75,6 | 28,7 | 75,2 | 6,53 | 50,67 | 589,8 | 120,1 |
| 45 | 41,0 | 82,3 | 29,6 | 77,5 | 7,10 | 55,17 | 550,1 | 112,0 |
| 50 | 43,2 | 103,5 | 30,1 | 78,8 | 8,93 | 69,37 | 529,4 | 107,8 |
| 55 | 43,3 | 113,3 | 30,1 | 78,8 | 9,78 | 75,94 | 528,8 | 107,6 |
| 59 | 50,0 | 94,2 | 31,5 | 82,5 | 8,13 | 63,15 | 465,8 | 94,8 |

Tabla 10: tabla en la que se recogen el valor inicial más los 12 valores seleccionados. Estos 12 valores han sido escogidos porque se encuentran en intervalos de días (cada 3-8 días) durante los que la evolución del biofouling apenas varía. ¹Valores porcentuales, empleados como datos de partida. También pueden usarse en algunos componentes, como el intercambiador de calor de la planta IEP. ²Temperatura de A/S a la entrada del intercambiador de calor. Es un parámetro que hay que ajustar en las 3 plantas. ³Temperatura de salida del Heat Adder, exclusivo de la planta IEP. La ventana de edición de este permite indicar de varias formas la temperatura final, ya sea como una variación o como el valor de salida final (en la tabla se indica como el valor de salida final, pero en los cálculos se muestra como una variación). ⁴Parámetro exclusivo de las plantas de turbinas y COGAS. Para cada planta hay unos valores asignados debido a que circulan diferentes caudales de A/S. ⁵Coefficiente de transferencia de calor global, UA, expresado en $kW/m^3°C$ (es la unidad en la que viene expresada en el programa). Para cada planta hay unos valores asignados debido a que circulan diferentes caudales de A/S.

En el modelo IEP se han introducido los datos de las 4 primeras columnas (excluyendo la de “Día”); en el modelo de turbinas de vapor se han empleado la 1ª, la 3ª y las dos columnas correspondientes de los otros dos parámetros; y en el modelo COGAS se

han seleccionado la 1ª y 3ª columnas, más las correspondientes a los dos últimos parámetros.

3.5. EVOLUCIÓN DE CADA PLANTA A PARTIR DE LOS CÁLCULOS USANDO LOS DATOS EXTRAPOLADOS DEL REGISTRO DE LA PLANTA PILOTO

Para finalizar, procedemos a introducir las variables de entrada y obtener los resultados a través de una hoja Excel y el complemento Elink.

El complemento Elink permite realizar la computarización del programa Thermoflex en una hoja de Excel y, además, graba las variables modificadas (permitiendo configurarlas en la misma hoja) y los valores obtenidos en una tabla. Resulta muy útil si se quiere simular distintas situaciones para un mismo modelo y almacenarlos.

En la Ilustración 54 y en la Ilustración 55 se recogen la parte superior de la hoja de cálculo, en la que se muestran las opciones que ofrece este complemento.

Ilustración 54: parte de la ventana superior de la hoja de cálculo, en la que se muestran en detalle, de izquierda a derecha: (1) opciones de abrir un nuevo archivo vinculado a la hoja y a otros programas de la casa Thermoflow, (2) opción de añadir o reducir el número de casos (número de muestras para analizar), y (3) opción de añadir o quitar variables de entrada y resultados.

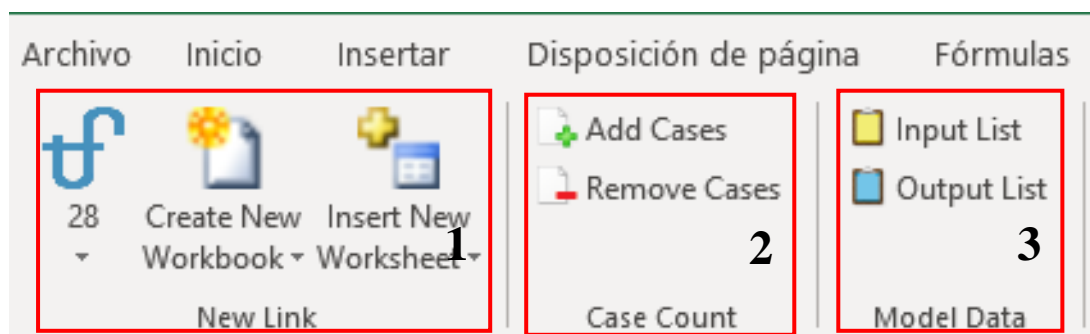
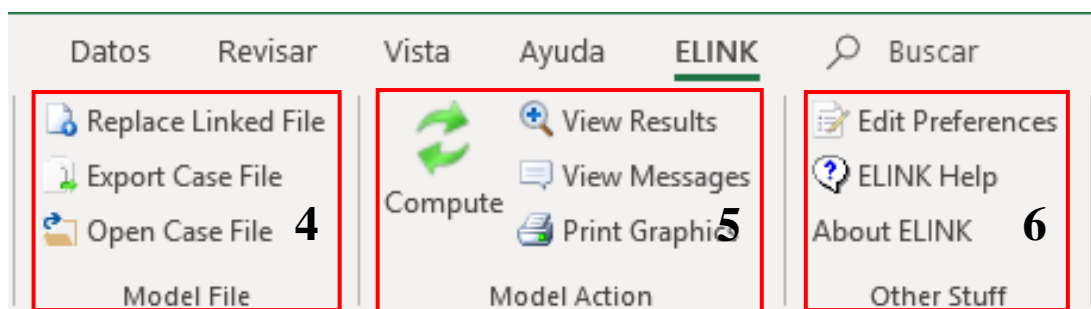


Ilustración 55: la otra parte de la ventana superior de la hoja de cálculo, en la que se muestran en detalle, de izquierda a derecha: (4) opción de sustituir el archivo o exportar y abrir casos concretos, (5) ejecutar hoja con los valores introducidos y devolver un resultado, y (6) opciones de ayuda y versión del complemento.



Centrándonos en el caso de estudio, se han seleccionado las variables de salida que se muestran en la Tabla 11, la Tabla 12 y la Tabla 13, de las plantas IEP, de turbinas de vapor y COGAS, respectivamente; disponibles al final del ANEXO II; para analizar la evolución de cada planta, basándonos en los mismos parámetros de ensuciamiento, descritos en la Tabla 10.

3.6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación, en la Ilustración 56 aparece la leyenda de todas las gráficas que hay en este apartado. Las tres primeras series se deben leer en el eje principal de las gráficas (eje izquierdo), mientras que las dos últimas deben leerse en el eje secundario (eje derecho).

Ilustración 56: leyenda de las gráficas correspondientes al apartado Resultados.

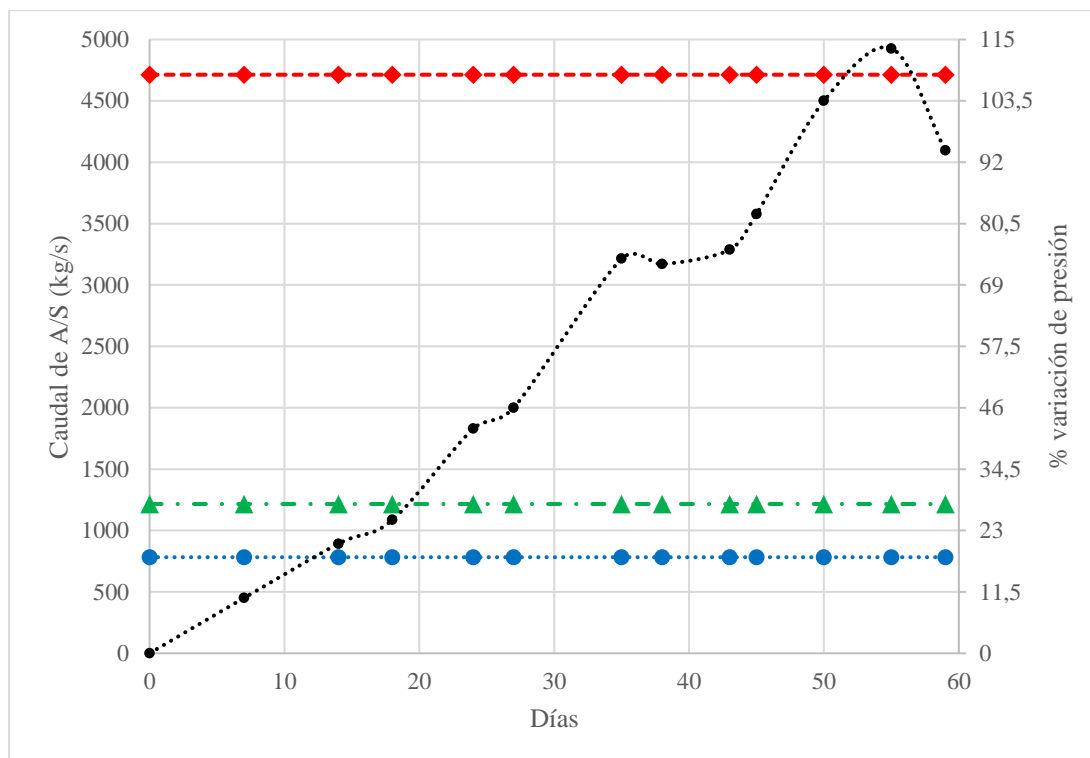
....●.... *Planta con sistema IFEP*

--♦-- *Planta con sistema de turbinas de vapor*

—▲— *Planta con sistema COGAS*

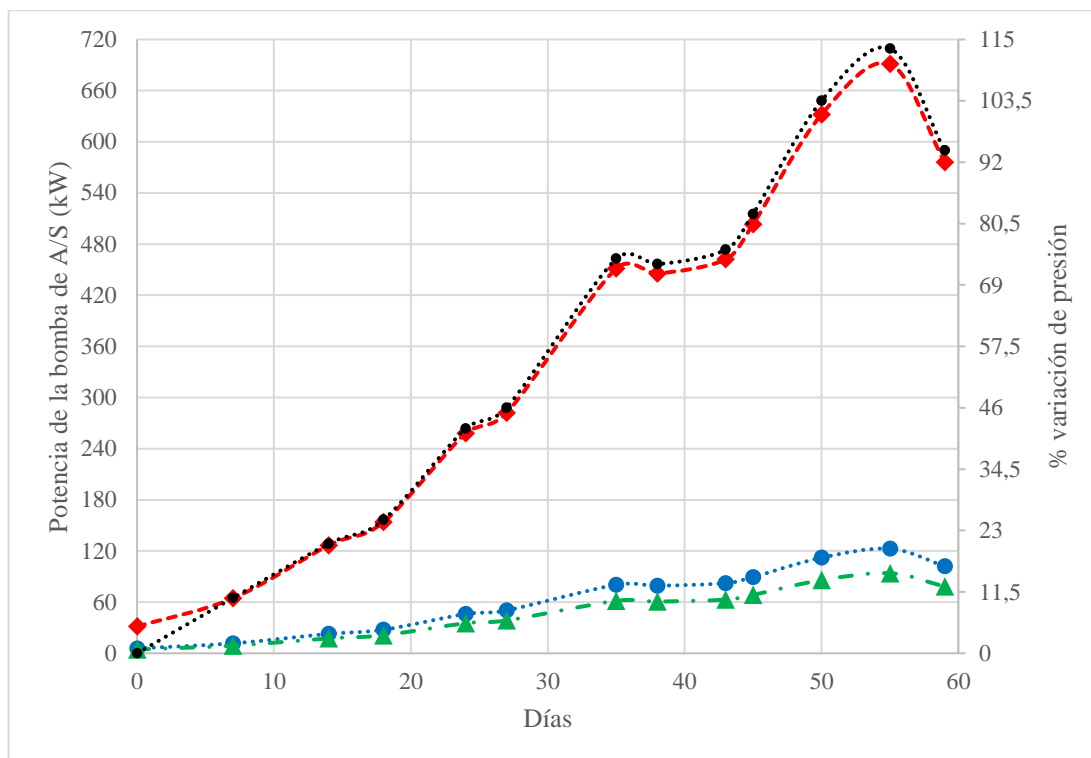
....●.... $\Delta p\%$ *en el intercambiador de calor*

--♦-- $\Delta\%$ *de resistencia a la transferencia de calor en el intercambiador de calor*



Gráfica 5: variación de caudal de A/S de refrigeración en función del tiempo. Deben permanecer constantes a lo largo del tiempo para garantizar la fiabilidad de los demás resultados.

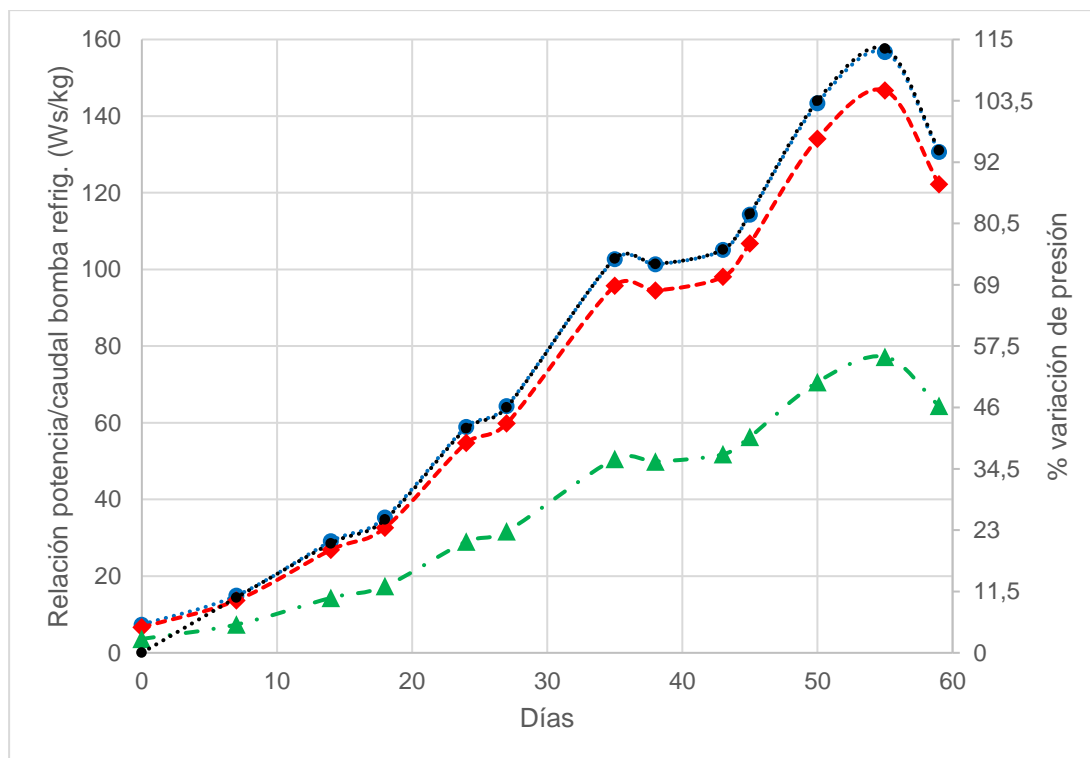
La planta que requiere un menor caudal de agua de refrigeración es la planta IFEP, seguida de la planta COGAS. La planta COGAS requiere un 55,4% más de flujo que la planta IFEP. Respecto a la planta de turbinas de vapor, el flujo requerido para refrigerarla supone 6 veces el caudal de la planta IFEP, y casi 4 veces la de la planta COGAS. Hay que tener en cuenta que la demanda de caudal está establecida en cada modelo para una potencia generada relativamente distinta, por lo que, seguramente, la diferencia relativa de caudales de refrigeración entre los modelos para una misma potencia establecida sea menor que los indicados aquí.



Gráfica 6: potencia que requiere la bomba de A/S de refrigeración, para mantener el mismo caudal, en función del tiempo. Viene expresada en kW. Destaca notablemente la mayor demanda de potencia que requiere la bomba de A/S en la planta de turbinas de vapor.

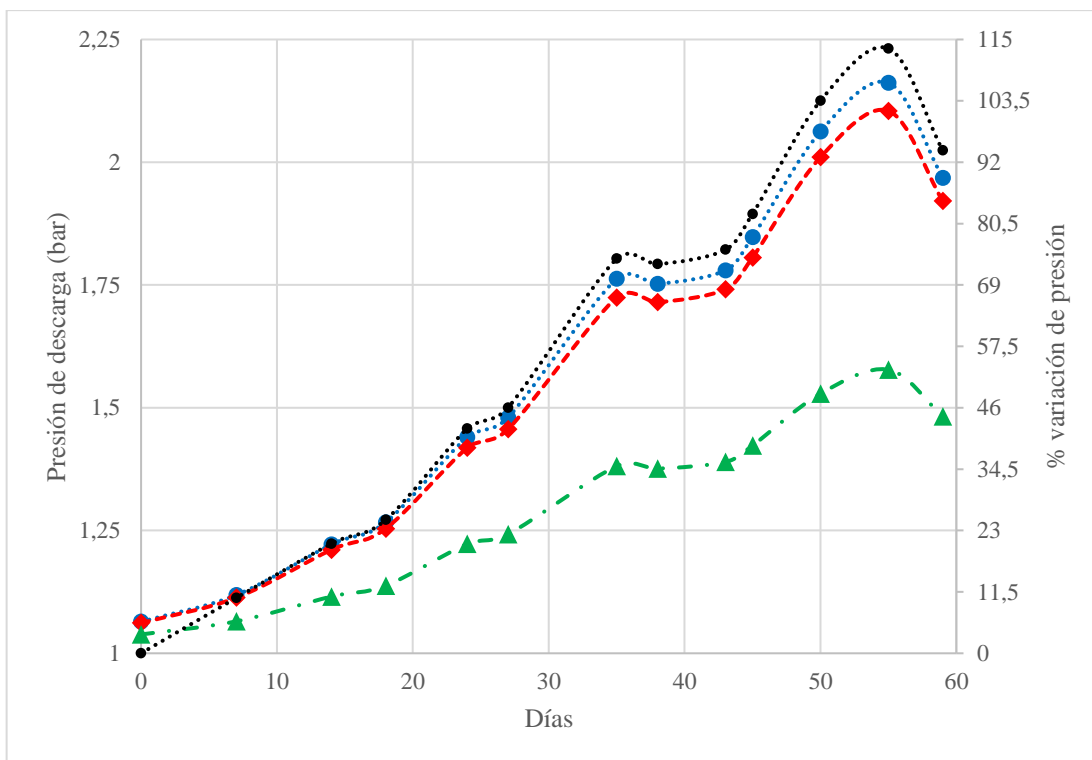
La planta que requiere suministrar menos potencia a la bomba de A/S² es la del sistema COGAS, seguida de la del sistema IFEP. La potencia demandada por la bomba de A/S del sistema de turbinas de vapor se incrementa sustancialmente, comparada con la evolución en los otros modelos. Esto puede ser debido a que, al demandar un mayor flujo de A/S de refrigeración se ensucie más rápidamente el intercambiador de calor (por llevar una mayor carga biológica por unidad de tiempo que los otros modelos), por lo que se genera una disminución de la sección de paso antes, y por ello, se dispara su consumo más rápidamente.

² Considerando un ensuciamiento en los circuitos de refrigeración proporcional al caudal que demanda cada planta.

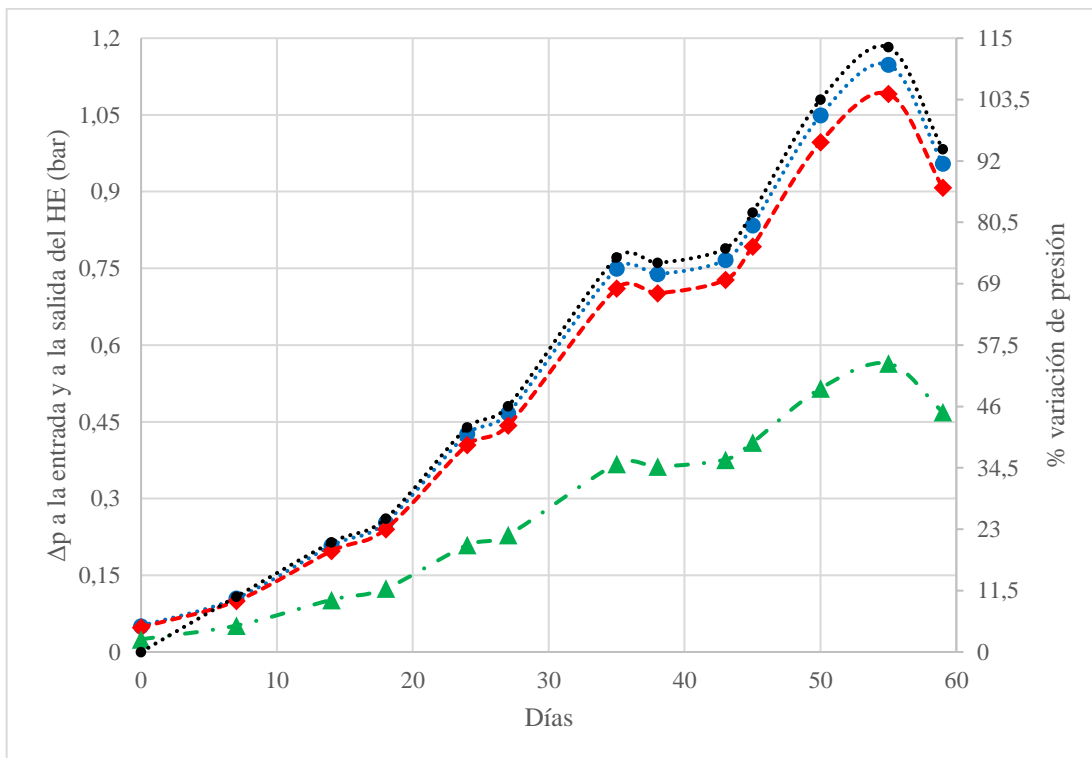


Gráfica 7: relación entre la potencia de la bomba y el caudal de A/S impulsado por esta en función del tiempo. Viene expresada en Ws/kg. La planta con sistema IFEP representa el mayor coste energético para abastecer la demanda de A/S de refrigeración.

Si observamos la Gráfica 7, hay que señalar que para abastecer con A/S la planta² es necesario consumir una mayor potencia en los modelos IFEP y de turbinas de vapor, mientras que en el sistema COGAS no representa un consumo tan alto.

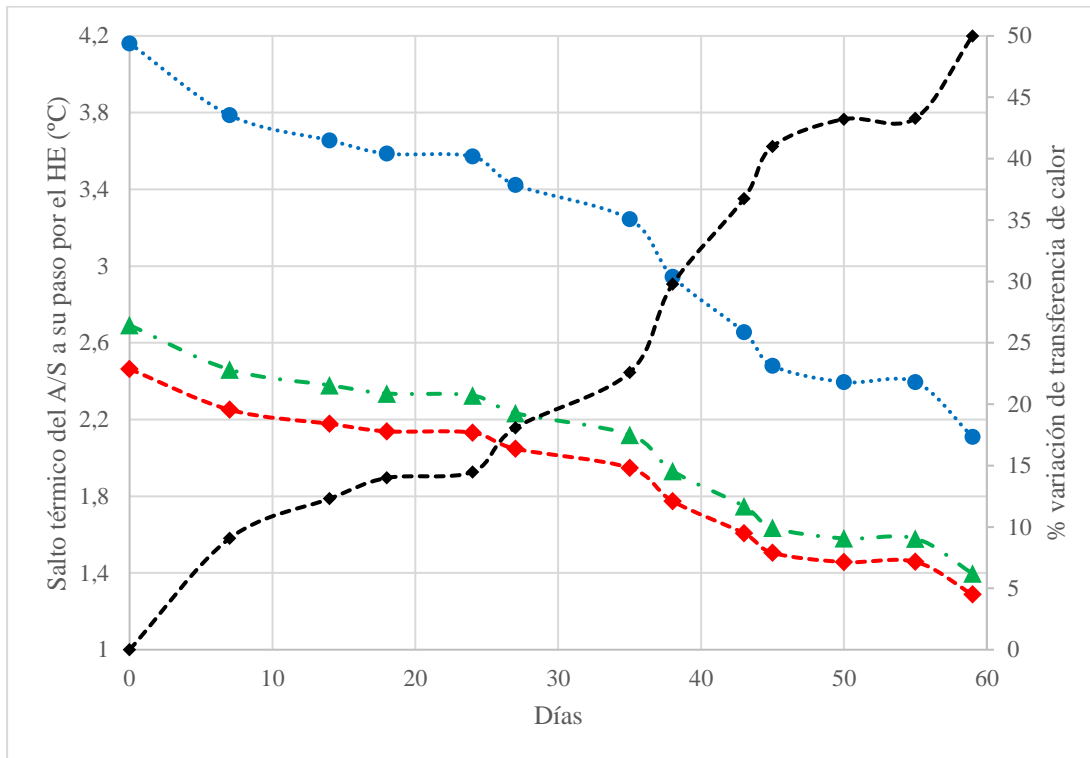


Gráfica 8: presión de descarga de la bomba de A/S de refrigeración en función del tiempo. Viene expresada en bares. Es notable que la bomba que debe suministrar una mayor presión es la de la planta con sistema IEP, y la que menos (considerablemente), la de la planta con sistema COGAS.



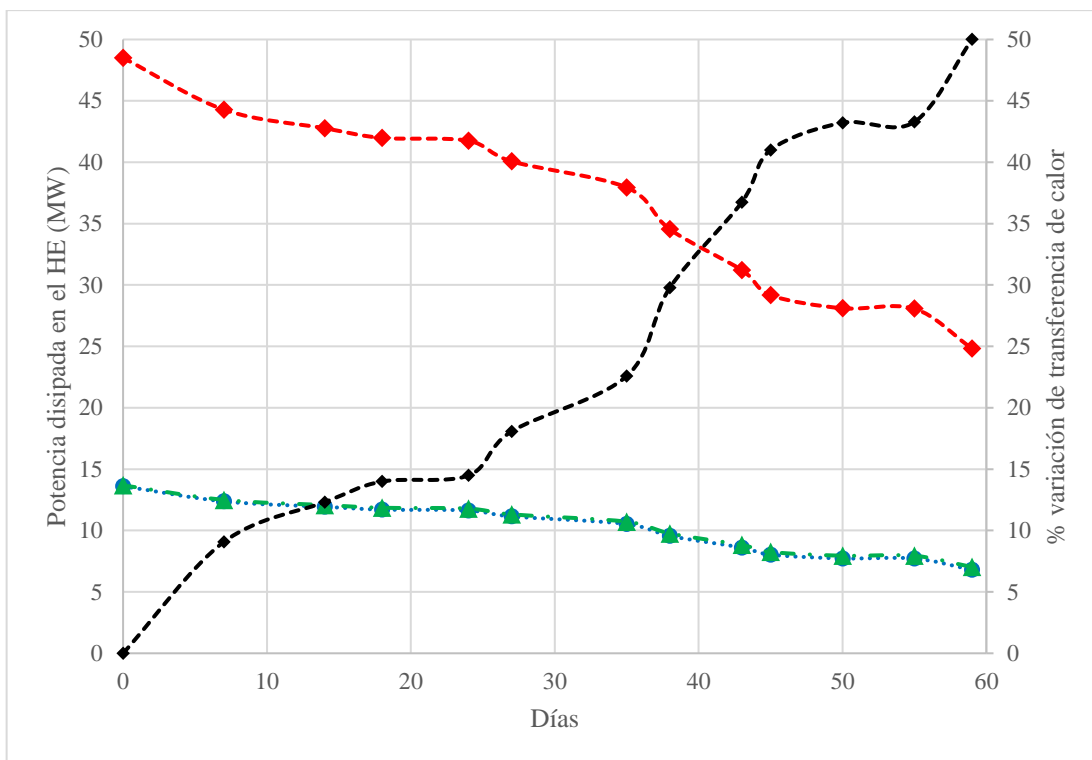
Gráfica 9: diferencia de presiones entre la entrada y la salida del intercambiador de calor (HE, Heat Exchanger) en el lado A/S. Viene expresada en bares. Hay que destacar la menor caída de presión en la planta con sistema COGAS, y la mayor, en la del sistema IEP.

A medida que se ensucian los circuitos de refrigeración, aumenta la presión de descarga de la bomba y el salto de presiones entre la entrada y la salida del intercambiador de calor en todos los modelos. La diferencia de resultados entre los modelos de turbinas de vapor y COGAS se podría deber a la misma razón que se comentó anteriormente² sobre la carga biológica que arrastra cada uno.

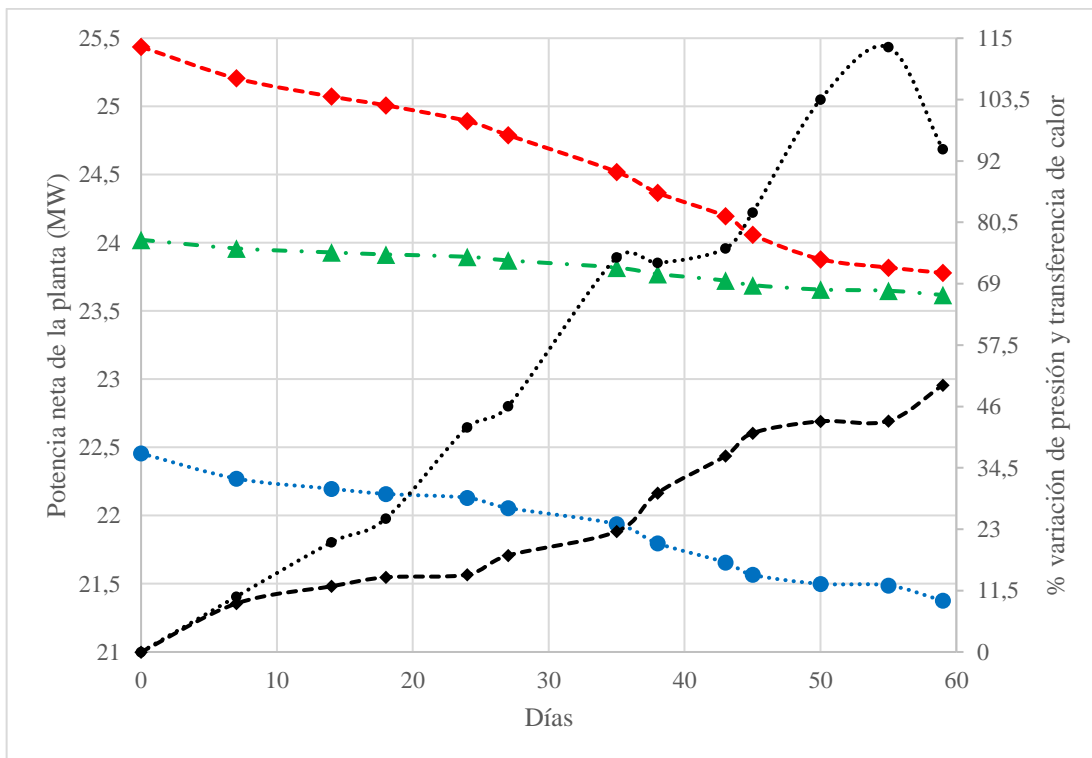


Gráfica 10: variación de temperatura entre la salida y la entrada del intercambiador de calor en el lado A/S a lo largo del tiempo. Viene expresada en °C. Se puede resaltar que la planta con sistema IEP sufre un mayor salto térmico, y la que menos, la del sistema de turbinas de vapor.

Una mayor demanda de caudal ofrece una menor perturbación en el salto térmico a medida que evoluciona el ensuciamiento, de manera que puede ser más difícil detectar el crecimiento de biofouling en las plantas de turbinas de vapor y COGAS a partir de la variación de la temperatura del A/S, y, sin embargo, sea más fácilmente detectable a partir del aumento del consumo de la bomba de refrigeración o de las caídas de presión.



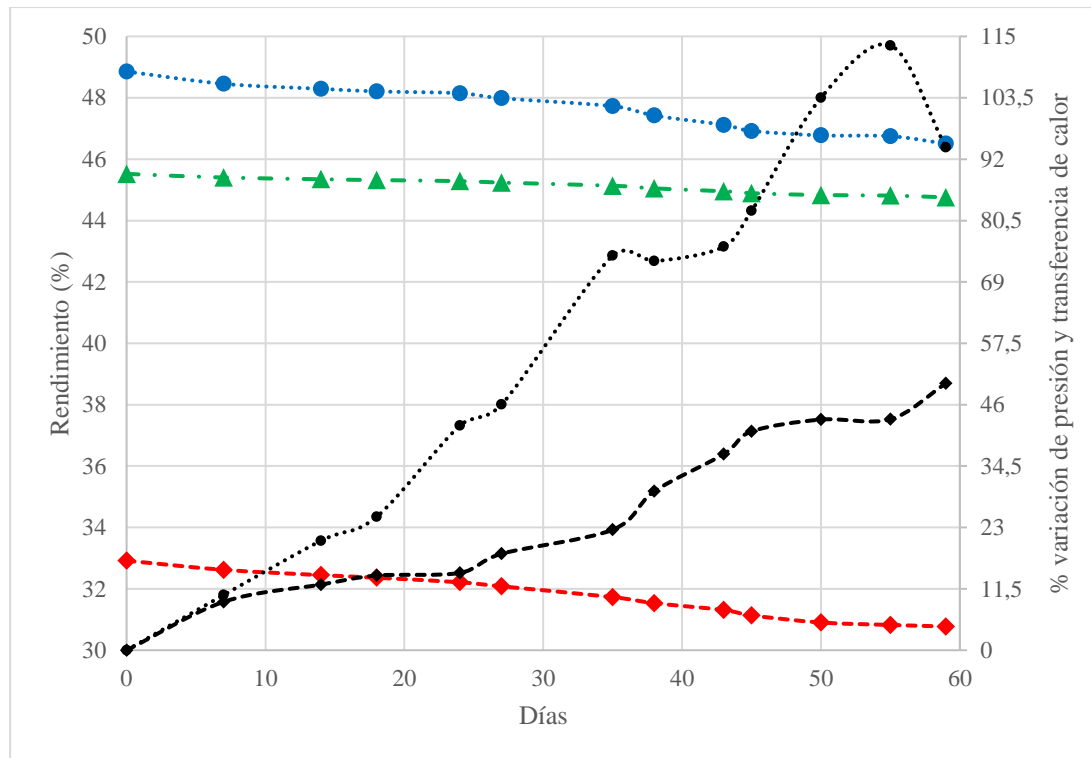
Gráfica 11: potencia disipada por el intercambiador de calor a través del A/S de refrigeración a lo largo del tiempo. Viene expresada en MW. Los valores de las plantas con sistemas IEP y COGAS se superponen en la gráfica, mientras que el sistema de turbinas de vapor requiere considerablemente una mayor potencia de disipación.



Gráfica 12: potencia neta generada por la planta a lo largo del tiempo. Viene expresada en MW. Es importante observar, más que la potencia generada en cada modelo, la pérdida de potencia con el paso del tiempo debido al ensuciamiento, la cual es mucho mayor en la del

sistema de turbinas de vapor. A continuación, le siguen el sistema IEP y, por último, el sistema COGAS.

El sistema que presenta una menor caída de potencia neta² es el modelo COGAS, con un 1,7%, frente al 4,8% del modelo IFEP, y al 6,5% del modelo de turbinas de vapor.



Gráfica 13: rendimiento de la planta a lo largo del tiempo. Viene expresado en porcentaje. Aquí hay que fijarse en dos aspectos: por un lado, los rendimientos de cada modelo: el que presenta mayor rendimiento es el modelo IFEP, seguido del modelo COGAS, ambos con unos valores que superan el 45%; y en último lugar y bastante distanciado, el modelo de turbinas de vapor, que no llega al 34%. El otro aspecto relevante es la variación del rendimiento debido al aumento de resistencia de transferencia de calor a lo largo del tiempo, donde destaca positivamente el sistema COGAS frente al sistema IFEP. Una vez más, el sistema de turbinas de vapor presenta una mayor pérdida de eficiencia frente al resto.

Por último, y lo más importante: el sistema que presenta mejor rendimiento (y, por tanto, mejor aprovechamiento del combustible) es el sistema IFEP, seguido del sistema COGAS. A pesar de los resultados obtenidos, este orden no cuadra si los comparamos con otros autores [1], [2], [4], [113]–[132], debido a que sus estudios (referentes a ciclos combinados) los han realizado en base a plantas industriales de mucha mayor capacidad de generación de energía. No obstante, los valores obtenidos sí que se encuentran comprendidos entre los que se mencionan. Por otro lado², el resultado revela que la planta COGAS presenta la menor pérdida de rendimiento de todos los sistemas, con un 1,7%, seguido con diferencia de la planta IFEP, con un 4,8%, y de la planta de turbinas de vapor, con un 6,5%.



4. CONCLUSIONES

A la hora de elegir una planta propulsora para el buque mercante, además de otros factores, como la disposición de los espacios y las características de la hélice, es necesario tener en cuenta elementos propios de cada modelo, como el peso, la potencia específica, los tiempos de respuesta, de puesta en marcha y de parada de la planta. Para examinar estos aspectos debemos acudir a textos alternativos para determinar las características de cada sistema, pues este estudio está centrado en comparar parámetros de energía y flujos teniendo en cuenta el ensuciamiento gradual que se produce con el tiempo en cada sistema.

Implementar el sistema COGAS es mejor que seguir optando por el sistema de turbinas de vapor o el sistema IFEP porque:

- **sufre una menor pérdida de potencia y rendimiento debido a los procesos de crecimiento del biofouling en la instalación.**
- **los sistemas de refrigeración requieren un menor suministro de caudal y de capacidad de disipación (equipos más pequeños y de menor consumo).**

Todo esto favorece el aumento sustancial de potencia específica, además de lograr un ahorro de combustible en el transporte y una mayor capacidad de carga.

En cuanto a la planta piloto localizada en el laboratorio de Biofouling-Emilio Eguía de la ETS de Náutica:

- **los datos de ensuciamiento biológico de la planta piloto resultan perfectamente extrapolables a los diferentes intercambiadores de calor de los buques, y pueden ser utilizados en otros tipos de buques.**
- **la planta piloto puede ser utilizada como una herramienta de estudio de la influencia del ensuciamiento biológico en la pérdida de eficiencia térmica de las plantas propulsoras de buques.**



BIBLIOGRAFÍA

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] F. D.F. Chuahy and S. L. Kokjohn, “Solid oxide fuel cell and advanced combustion engine combined cycle: A pathway to 70% electrical efficiency,” *Appl. Energy*, vol. 235, pp. 391–408, Feb. 2019.
- [2] L. Blain, “Wärtsilä’s new 31 becomes the most efficient 4-stroke diesel engine in the world,” 2015. [Online]. Disponible en: <https://newatlas.com/wartsila-31-worlds-most-efficient-4-stroke-diesel-engine/38120/>. [Fecha de acceso: 26-Jun-2019].
- [3] B. Lamb, “PLATE AND FRAME HEAT EXCHANGERS,” in *A-to-Z Guide to Thermodynamics, Heat and Mass Transfer, and Fluids Engineering*, Begellhouse, 2011.
- [4] A. S. Lebedev and S. V. Kostennikov, “Trends in increasing gas-turbine units efficiency,” *Therm. Eng.*, vol. 55, no. 6, pp. 461–468, Jun. 2008.
- [5] L. Chen, Y. Zhang, and Q. Wu, “Effect of Graphene Coating on the Heat Transfer Performance of a Composite Anti-/Deicing Component,” *Coatings*, vol. 7, no. 10, p. 158, 2017.
- [6] C. Maldonado, *El mantenimiento preventivo*. Index, 1979.
- [7] Wikipedia, “Planta piloto - Wikipedia, la enciclopedia libre.” [Online]. Disponible en: https://es.wikipedia.org/wiki/Planta_piloto. [Fecha de acceso: 03-Dec-2018].
- [8] S. García, A. Trueba, L. Vega, and E. Madariaga, “Improvement of Electromagnetic Fields treatment for biofouling growth control in tubular heat exchanger-condenser cooled by seawater,” in *OCEANS 2017 - Aberdeen*, 2017, vol. 2017-Octob, pp. 1–5.
- [9] A. Trueba, S. García, F. M. Otero, L. M. Vega, and E. Madariaga, “The effect of electromagnetic fields on biofouling in a heat exchange system using seawater,” *Biofouling*, vol. 31, no. 1, pp. 19–26, 2015.
- [10] S. García Gómez, “Aplicación de campos electromagnéticos en la eliminación y control de la película biológica en intercambiadores de calor tubulares refrigerados por agua de mar,” Universidad de Cantabria, 2016.
- [11] “LNG COGES-Powered 20,000 TEU Ship Closer To Reality,” 2017.
- [12] “SMM: New Partners in COGAS Container Ship Project,” 2016.
- [13] “PERFECt LNG-fuelled box ship moves into second phase,” 2016.
- [14] R. F. Piola, K. A. Dafforn, and E. L. Johnston, “The influence of antifouling practices on marine invasions,” *Biofouling*, vol. 25, no. 7, pp. 633–644, May 2009.
- [15] I. Fitridge, T. Dempster, J. Guenther, and R. de Nys, “The impact and control of biofouling in marine aquaculture: A review,” *Biofouling*, vol. 28, no. 7, pp.



649–669, Aug. 2012.

- [16] T. S. Rao, A. J. Kora, P. Chandramohan, B. S. Panigrahi, and S. V. Narasimhan, “Biofouling and microbial corrosion problem in the thermo-fluid heat exchanger and cooling water system of a nuclear test reactor,” *Biofouling*, vol. 25, no. 7, pp. 581–591, May 2009.
- [17] D. J. Blackwood, C. S. Lim, S. L. M. Teo, X. Hu, and J. Pang, “Macrofouling induced localized corrosion of stainless steel in Singapore seawater,” *Corros. Sci.*, vol. 129, pp. 152–160, Dec. 2017.
- [18] P. K. Abdul Azis, I. Al-Tisan, and N. Sasikumar, “Biofouling potential and environmental factors of seawater at a desalination plant intake,” *Desalination*, vol. 135, no. 1–3, pp. 69–82, Apr. 2001.
- [19] S. Yan *et al.*, “A state-of-the-art review on passivation and biofouling of Ti and its alloys in marine environments,” *J. Mater. Sci. Technol.*, vol. 34, no. 3, pp. 421–435, Mar. 2018.
- [20] J. Telegdi, L. Trif, and L. Románszki, “Smart anti-biofouling composite coatings for naval applications,” in *Smart Composite Coatings and Membranes: Transport, Structural, Environmental and Energy Applications*, Woodhead Publishing, 2015, pp. 123–155.
- [21] F. Garaventa *et al.*, “Settlement of the alien mollusc *Brachidontes pharaonis* in a Mediterranean industrial plant: Bioassays for antifouling treatment optimization and management,” *Mar. Environ. Res.*, vol. 76, pp. 90–96, May 2012.
- [22] C. López-Galindo, J. F. Casanueva, and E. Nebot, “Efficacy of different antifouling treatments for seawater cooling systems,” *Biofouling*, vol. 26, no. 8, pp. 923–930, Oct. 2010.
- [23] J. P. Holman, P. de Assas Martínez de Morentín, T. de J. Leo Mena, and P. Pérez del Notario Martíenz de Maraón, *Transferencia de calor*. McGraw-Hill, 1998.
- [24] L. del. Arco Vicente, *Termotecnia : calor industrial : transferencia, producción y aplicaciones*. Editorial Mitre, 1984.
- [25] S. Kakaç, *Boilers, Evaporators, and Condensers-Wiley-Interscience*. 1991.
- [26] O. Lavensipel, *Flujos de Fluidos e Intercambio de Calor*. Reverté, 1996.
- [27] B. Río Calonge and Belén, “Eliminación del biofouling en intercambiadores de calor-condensadores que minimicen el impacto ambiental en el medio marino,” Universidad de Cantabria, 1999.
- [28] M. N. Frota, E. M. Ticona, A. V. Neves, R. P. Marques, S. L. Braga, and G. Valente, “On-line cleaning technique for mitigation of biofouling in heat exchangers: A case study of a hydroelectric power plant in Brazil,” *Exp. Therm. Fluid Sci.*, vol. 53, pp. 197–206, Feb. 2014.
- [29] Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía., *Uso eficiente de energía en calderas y redes de fluidos*. IDAE, 1988.
- [30] J. E. C. M.E. Callow, “Control del Biofouling,” pp. 10–14, 2002.



- [31] A. S. Clare and N. Aldred, “Surface colonisation by marine organisms and its impact on antifouling research,” in *Advances in Marine Antifouling Coatings and Technologies*, Woodhead Publishing, 2009, pp. 46–79.
- [32] L. Petrone, “Molecular surface chemistry in marine bioadhesion,” *Advances in Colloid and Interface Science*, vol. 195–196. Elsevier, pp. 1–18, 01-Jul-2013.
- [33] A. I. Railkin, *Marine biofouling: Colonization processes and defenses*. CRC Press, 2003.
- [34] H.-C. Flemming, U. Szewzyk, T. Griebel, U. Szewzyk, and T. Griebel, *Biofilms*. CRC Press, 2000.
- [35] Y. Li and C. Ning, “Latest research progress of marine microbiological corrosion and bio-fouling, and new approaches of marine anti-corrosion and anti-fouling,” *Bioactive Materials*, vol. 4. pp. 189–195, Dec-2019.
- [36] W. D. 1940- Callister, D. G. Rethwisch, P. Molera Solá, and M. N. Salán Ballesteros, *Ciencia e ingeniería de los materiales*, 2nd ed. 2015.
- [37] R. Jia, T. Unsal, D. Xu, Y. Lekbach, and T. Gu, “Microbiologically influenced corrosion and current mitigation strategies: A state of the art review,” *International Biodeterioration and Biodegradation*, vol. 137. Elsevier, pp. 42–58, 01-Feb-2019.
- [38] T. Gu, K. Zhao, and S. Nesic, “A new mechanistic model for MIC based on a biocatalytic cathodic sulfate reduction theory,” in *Corrosion*, 2009, no. 09390, pp. 1–12.
- [39] B. Hou *et al.*, “The cost of corrosion in China,” *npj Mater. Degrad.*, vol. 1, no. 1, p. 4, Dec. 2017.
- [40] H. Y. Zakaria, “Article Review: Lessepsian migration of zooplankton through Suez Canal and its impact on ecological system,” *Egyptian Journal of Aquatic Research*, vol. 41, no. 2. pp. 129–144, 2015.
- [41] I. Con and L. A. S. Primeras, “Xenostrobus Securis,” no. August, p. 600, 2014.
- [42] Y. Halim, “On the potential migration of Indo-Pacific plankton through the Suez Canal,” *Bull. Inst. Ocean. Monaco*, vol. num. spec., no. 7, pp. 11–27, 1990.
- [43] F. D. Por, *Lessepsian migration. The influx of Red Sea biota into the Mediterranean by way of the Suez Canal*, Berlin. 1978. DM 64. Berlin, 1978.
- [44] “Lessepsian migration,” 2019. [Online]. Disponible en: https://en.wikipedia.org/wiki/Lessepsian_migration.
- [45] J. Sinden *et al.*, “The economic impact of weeds in Australia, Technical Series 8,” *CRC Aust. Weed Manag. Glen Osmond, SA*, 2004.
- [46] D. PIMENTEL, L. LACH, R. ZUNIGA, and D. MORRISON, “Environmental and Economic Costs of Nonindigenous Species in the United States,” *Bioscience*, vol. 50, no. 1, p. 53, Jan. 2006.
- [47] D. Roberts, D. Rittschof, E. Holm, and A. R. Schmidt, “Factors influencing initial larval settlement: temporal, spatial and surface molecular components,” *J. Exp. Mar. Bio. Ecol.*, vol. 150, no. 2, pp. 203–221, Aug. 1991.



- [48] D. M. Yebra, S. Kiil, and K. Dam-Johansen, “Antifouling technology - Past, present and future steps towards efficient and environmentally friendly antifouling coatings,” *Progress in Organic Coatings*, vol. 50, no. 2. Elsevier, pp. 75–104, 01-Jul-2004.
- [49] “Crecimiento y propiedades de los cristales | Textos Científicos.” [Online]. Disponible en: <https://www.textoscientificos.com/quimica/cristales/crecimiento-cristales>. [Fecha de acceso: 11-Feb-2019].
- [50] T. Vladkova, “Surface Modification Approach to Control Biofouling,” in *Marine and Industrial Biofouling*, vol. 4, no. 1, Berlin, Heidelberg: Springer, Berlin, Heidelberg, 2008, pp. 135–163.
- [51] E. Wallhäußer, M. A. Hussein, and T. Becker, “Detection methods of fouling in heat exchangers in the food industry,” *Food Control*, vol. 27, no. 1. Elsevier, pp. 1–10, 01-Sep-2012.
- [52] T. R. (Theodore R. Bott, *Fouling of heat exchangers*. Elsevier, 1995.
- [53] M. Al-Bloushi *et al.*, “Performance assessment of oxidants as a biocide for biofouling control in industrial seawater cooling towers,” *J. Ind. Eng. Chem.*, vol. 59, pp. 127–133, Mar. 2018.
- [54] K. P. H. Meesters, J. W. Van Groenestijn, and J. Gerritse, “Biofouling reduction in recirculating cooling systems through biofiltration of process water,” *Water Res.*, vol. 37, no. 3, pp. 525–532, Feb. 2003.
- [55] W. G. Characklis, “Biofouling: Effects and Control,” in *Biofouling and Biocorrosion in Industrial Water Systems*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011, pp. 7–27.
- [56] B. Langlais, D. A. Reckhow, D. R. Brink, AWWA Research Foundation., and F. Compagnie générale des eaux (Paris, *Ozone in water treatment : application and engineering : cooperative research report*. Lewis Publishers, 1991.
- [57] Y. Ikegami and K. Urata, “Antifouling Technology for Seawater Intake Pipes of OTEC using Ozonation,” vol. 4, no. 2006, pp. 337–342, Jan. 2006.
- [58] H. Crittenden, J. C., Trussel, R. R., Hand, D. W., *MWH’s water treatment: principles and design.*, no. New york. John Wiley & Sons, 2012.
- [59] International Life Sciences Institute, *Safety of Water Disinfection: Balancing Chemical and Microbial Risks (Water safety series)*. ILSI Press, 1993.
- [60] H. W. Yu, S. G. Oh, I. S. Kim, I. Pepper, S. Snyder, and A. Jang, “Formation and speciation of haloacetic acids in seawater desalination using chlorine dioxide as disinfectant,” *J. Ind. Eng. Chem.*, vol. 26, pp. 193–201, Jun. 2015.
- [61] G. Petrucci and M. Rosellini, “Chlorine dioxide in seawater for fouling control and post-disinfection in potable waterworks,” *Desalination*, vol. 182, no. 1–3, pp. 283–291, Nov. 2005.
- [62] E. Agus, N. Voutchkov, and D. L. Sedlak, “Disinfection by-products and their potential impact on the quality of water produced by desalination systems: A literature review,” *Desalination*, vol. 237, no. 1–3, pp. 214–237, Feb. 2009.



- [63] L. E. Applegate, C. W. Erkenbrecher, and H. Winters, “New chloroamine process to control aftergrowth and biofouling in permasepR B-10 RO surface seawater plants,” *Desalination*, vol. 74, no. C, pp. 51–67, Jan. 1989.
- [64] D. Rice, P. Westerhoff, F. Perreault, and S. Garcia-Segura, “Electrochemical self-cleaning anodic surfaces for biofouling control during water treatment,” *Electrochem. commun.*, vol. 96, pp. 83–87, Nov. 2018.
- [65] J. Mansouri, S. Harrisson, and V. Chen, “Strategies for controlling biofouling in membrane filtration systems: Challenges and opportunities,” *J. Mater. Chem.*, vol. 20, no. 22, pp. 4567–4586, May 2010.
- [66] W. Jiang, Y. Wei, X. Gao, C. Gao, and Y. Wang, “An innovative backwash cleaning technique for NF membrane in groundwater desalination: Fouling reversibility and cleaning without chemical detergent,” *Desalination*, vol. 359, pp. 26–36, Mar. 2015.
- [67] G. A. Boorman *et al.*, “Drinking water disinfection byproducts: Review and approach to toxicity evaluation,” *Environmental Health Perspectives*, vol. 107, no. SUPPL. 1, pp. 207–217, 1999.
- [68] “MEXEL 432® – Biodegradable Antifouling Agent: Mexel Industries | Environmentally Friendly ‘Green’ Solutions For Industry,” 2012. [Online]. Disponible en: <http://www.mexel432.com/en/products-solutions/mexel-432-water-cooling-circuits/>. [Fecha de acceso: 27-Jun-2019].
- [69] “Mexel 432 injection system Power Station water outlet Flow 22 m3/s-Open cooling circuit, Sea Water-Treated with MEXEL Micro & Macro Fouling Efficiency Degradation Condenser Power Station Treated with MEXEL 432,” 2012.
- [70] E. Eguía, A. Trueba, B. Río-Calonge, A. Girón, and C. Bielsa, “Biofilm control in tubular heat exchangers refrigerated by seawater using flow inversion physical treatment,” *Int. Biodeterior. Biodegrad.*, vol. 62, no. 2, pp. 79–87, Sep. 2008.
- [71] M. A. Champ and P. F. (Peter F. . Seligman, *Organotin : Environmental fate and effects*. Springer Netherlands, 1996.
- [72] F. A. Guardiola, A. Cuesta, J. Meseguer, and M. A. Esteban, “Risks of using antifouling biocides in aquaculture,” *International Journal of Molecular Sciences*, vol. 13, no. 2. Molecular Diversity Preservation International, pp. 1541–1560, 02-Feb-2012.
- [73] R. K. Chow, W. & Kawaratani, “Biofouling Assessment and Control: An Electric Power Research Institute Overview. Environmental Impact and Health Effects, Water Chlorination,” vol. Vol. 4, pp. 887–900, 1983.
- [74] J. Mussalli, Y. G. & Tsou, “Advances in Biofouling Control Technologies: U.S. and Japanese Perspectives. Proceedings of the American Power Conference,” 1989, p. Vol. 51, pp. 1094–1099.
- [75] M. G. Hadfield, E. J. Carpizo-Ituarte, K. Del Carmen, and B. T. Nedved, “Metamorphic competence, a major adaptive convergence in marine invertebrate larvae,” *Am. Zool.*, vol. 41, no. 5, pp. 1123–1131, 2001.



- [76] C. M. Magin, S. P. Cooper, and A. B. Brennan, "Non-toxic antifouling strategies," *Materials Today*, vol. 13, no. 4. pp. 36–44, Apr-2010.
- [77] J. R. Almeida and V. Vasconcelos, "Natural antifouling compounds: Effectiveness in preventing invertebrate settlement and adhesion," *Biotechnology Advances*, vol. 33, no. 3–4. pp. 343–357, May-2015.
- [78] Y. G. Mussalli, "Effective Control Technologies for Zebra Mussels: Worldwide Experiences. Proceedings of the American Power Conference," 1990, p. Vol. 52, p.
- [79] J. L. Mussalli, Y. G. & Tsou, "Nontoxic Fouling Control Technologies: U.S. and Japanese Perspectives. EPRI Service Water System Reliability Improvement Seminar," 1988.
- [80] A. Al-Amoudi and R. W. Lovitt, "Fouling strategies and the cleaning system of NF membranes and factors affecting cleaning efficiency," *Journal of Membrane Science*, vol. 303, no. 1–2. Elsevier, pp. 4–28, 15-Oct-2007.
- [81] C. Marconnet *et al.*, "Membrane biofouling control by UV irradiation," *Desalination*, vol. 276, no. 1–3, pp. 75–81, Aug. 2011.
- [82] J. B. Clark, J. C. Luppens, and P. T. Tucker, "Using Ultraviolet Radiation for Controlling Sulfate-Reducing Bacteria in Injection Water," in *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, 1984.
- [83] T. E. Cloete, V. S. Brözel, and A. Von Holy, "Practical aspects of biofouling control in industrial water systems," *Int. Biodeterior. Biodegrad.*, vol. 29, no. 3–4, pp. 299–341, Jan. 1992.
- [84] "Tratamiento ultravioleta del agua de lastre." [Online]. Disponible en: https://www.heraeus.com/es/hng/industries_and_applications/uv_technology/uv_ballast_water_treatment.aspx. [Fecha de acceso: 12-Dec-2018].
- [85] P. Giannoni *et al.*, "Osteogenic Differentiation of Human Mesenchymal Stromal Cells on Surface-Modified Titanium Alloys for Orthopedic and Dental Implants," *Int. J. Artif. Organs*, vol. 32, no. 11, pp. 811–820, Nov. 2009.
- [86] K. L. Kilpadi, P.-L. Chang, and S. L. Bellis, "Hydroxylapatite binds more serum proteins, purified integrins, and osteoblast precursor cells than titanium or steel," *J. Biomed. Mater. Res.*, vol. 57, no. 2, pp. 258–267, Nov. 2001.
- [87] B. Grosogeat, L. Reclaru, M. Lissac, and F. Dalard, "Measurement and evaluation of galvanic corrosion between titanium/Ti6Al4V implants and dental alloys by electrochemical techniques and auger spectrometry," *Biomaterials*, vol. 20, no. 10, pp. 933–941, May 1999.
- [88] R. Tejero, E. Anitua, and G. Orive, "Toward the biomimetic implant surface: Biopolymers on titanium-based implants for bone regeneration," *Prog. Polym. Sci.*, vol. 39, no. 7, pp. 1406–1447, Jul. 2014.
- [89] H.-C. Flemming, "Biofouling in water systems – cases, causes and countermeasures," *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, vol. 59, no. 6, pp. 629–640, Sep. 2002.
- [90] J. C. Williams and E. A. Starke, "Progress in structural materials for aerospace



- systems,” *Acta Mater.*, vol. 51, no. 19, pp. 5775–5799, Nov. 2003.
- [91] C. Cui, B. Hu, L. Zhao, and S. Liu, “Titanium alloy production technology, market prospects and industry development,” *Mater. Des.*, vol. 32, no. 3, pp. 1684–1691, Mar. 2011.
- [92] G. Sternhell, P. D. Taylor, and D. Itzhak, “GALVANIC EFFECTS OF VARIOUS METALLIC COUPLES ON MARINE BIOFOULING IN A CORAL REEF ENVIRONMENT,” *Corros. Rev.*, vol. 20, no. 6, pp. 453–468, Jan. 2002.
- [93] F. Hua, P. Pasupathi, K. Mon, G. Gordon, and D. Shoesmith, “Modeling the hydrogen-induced cracking of titanium alloys in nuclear waste repository environments,” *JOM*, vol. 57, no. 1, pp. 20–26, Jan. 2005.
- [94] H. Wake *et al.*, “Development of an electrochemical antifouling system for seawater cooling pipelines of power plants using titanium,” *Biotechnol. Bioeng.*, vol. 95, no. 3, pp. 468–473, Oct. 2006.
- [95] J. Been and K. Faller, “Using Ti-5111 for marine fastener applications,” *JOM*, vol. 51, no. 6, pp. 21–24, Jun. 1999.
- [96] I. . Gorynin, “Titanium alloys for marine application,” *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 263, no. 2, pp. 112–116, May 1999.
- [97] “Bahía de Santander,” *Wikipedia*, 2017. [Online]. Disponible en: https://es.wikipedia.org/wiki/Bahía_de_Santander. [Fecha de acceso: 07-Dec-2018].
- [98] T. J. McCoy and J. V. Amy, “The state-of-the-art of integrated electric power and propulsion systems and technologies on ships,” in *2009 IEEE Electric Ship Technologies Symposium*, 2009, pp. 340–344.
- [99] J. Pike, “Hybrid Combined Propulsion Systems,” *GlobalSecurity.org*, 2018. [Online]. Disponible en: <https://www.globalsecurity.org/military/systems/ship/systems/hybrid.htm>. [Fecha de acceso: 20-Mar-2019].
- [100] B. Ashok, S. Denis Ashok, and C. Ramesh Kumar, “LPG diesel dual fuel engine - A critical review,” *Alexandria Eng. J.*, vol. 54, no. 2, pp. 105–126, Jun. 2015.
- [101] B. Knutsen, “Knutsen OAS Shipping.” [Online]. Disponible en: <https://knutsenoas.com/shipping/lng-carriers/sevilla/>. [Fecha de acceso: 20-Feb-2019].
- [102] Hispania Spirit. Machinery book, *Machinery Operating Manual*. .
- [103] B. Knutsen, *Knutsen OAS Shipping*. .
- [104] B. Knutsen, “Knutsen OAS Shipping.” [Online]. Disponible en: <https://knutsenoas.com/shipping/lng-carriers/bilbao/>. [Fecha de acceso: 20-Feb-2019].
- [105] U. De Cantabria, A. Sañudo Espada, and A. Vega Omaña, “ESTUDIO Y ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DEL BUQUE SESTAO KNUTSEN EN FUNCIÓN DEL AISLAMIENTO DEL SISTEMA DE CONTENCIÓN DE LA CARGA,” p. 97, 2017.



- [106] “COGAS - Wikipedia, la enciclopedia libre,” 2016. [Online]. Disponible en: <https://es.wikipedia.org/wiki/COGAS>. [Fecha de acceso: 20-Mar-2019].
- [107] “Overview.” [Online]. Disponible en: https://www.thermoflow.com/products_overview.html. [Fecha de acceso: 20-Feb-2019].
- [108] “KGT - GPB180/180D (18MWClass).” [Online]. Disponible en: <http://www.kawasakigasturbines.com/index.php/site/product/gpb180/>. [Fecha de acceso: 12-Jun-2019].
- [109] “Gas Turbine Generator Set GPB180D Gas Turbine Type L20-A L20-A GPB180D,” 2008, pp. 713–803.
- [110] “GPB180D.” [Online]. Disponible en: <https://www.kawasaki-gasturbine.de/en/products/turbine-generator-sets/gpb180d>. [Fecha de acceso: 12-Jun-2019].
- [111] ACEJ, “Cogeneration System,” 2013, pp. 2–5.
- [112] L. MONCADA ALBITRES, “Diseño De Plantas De Procesos Químicos” Intercambiadores De Calor,” Perú: Universidad Nacional de Trujillo.
- [113] G. Zhang, J. Zheng, A. Xie, Y. Yang, and W. Liu, “Thermodynamic analysis of combined cycle under design/off-design conditions for its efficient design and operation,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 126, pp. 76–88, Oct. 2016.
- [114] A. A. Taimoor, A. Muhammad, W. Saleem, and M. Zain-ul-abdein, “Humidified exhaust recirculation for efficient combined cycle gas turbines,” *Energy*, vol. 106, pp. 356–366, Jul. 2016.
- [115] M. K. Sahu and Sanjay, “Comparative exergoeconomics of power utilities: Air-cooled gas turbine cycle and combined cycle configurations,” *Energy*, vol. 139, pp. 42–51, Nov. 2017.
- [116] S. W. Moon, H. M. Kwon, T. S. Kim, D. W. Kang, and J. L. Sohn, “A novel coolant cooling method for enhancing the performance of the gas turbine combined cycle,” *Energy*, vol. 160, pp. 625–634, Oct. 2018.
- [117] Z. Liu and I. A. Karimi, “New operating strategy for a combined cycle gas turbine power plant,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 171, pp. 1675–1684, Sep. 2018.
- [118] H. M. Kwon, T. S. Kim, J. L. Sohn, and D. W. Kang, “Performance improvement of gas turbine combined cycle power plant by dual cooling of the inlet air and turbine coolant using an absorption chiller,” *Energy*, vol. 163, pp. 1050–1061, Nov. 2018.
- [119] J. Kotowicz, M. Brzączek, and M. Job, “The thermodynamic and economic characteristics of the modern combined cycle power plant with gas turbine steam cooling,” *Energy*, vol. 164, pp. 359–376, Dec. 2018.
- [120] R. Kehlhofer and R. Kehlhofer, *Combined-cycle gas & steam turbine power plants*, vol. 29, no. 04. PennWell, 2013.
- [121] S. S. Penner, *Combined power plants, including Combined Cycle Gas Turbine (CCGT) plants*, vol. 18, no. 6. Elsevier Science, 2003.



- [122] N. Delgado, Oscar; Lutsey, “Advanced tractor-trailer efficiency technology potential in the 2020–2030 timeframe | International Council on Clean Transportation,” *The International Council on Clean Transportation*, 2015. [Online]. Disponible en: <https://www.theicct.org/publications/advanced-tractor-trailer-efficiency-technology-potential-2020-2030-timeframe>. [Fecha de acceso: 26-Jun-2019].
- [123] N. Lutsey, “The ever-improving efficiency of the diesel engine | International Council on Clean Transportation,” 2015. [Online]. Disponible en: <https://www.theicct.org/blogs/staff/ever-improving-efficiency-diesel-engine>. [Fecha de acceso: 26-Jun-2019].
- [124] D. R. Johnson, R. Heltzel, A. C. Nix, N. Clark, and M. Darzi, “Greenhouse gas emissions and fuel efficiency of in-use high horsepower diesel, dual fuel, and natural gas engines for unconventional well development,” *Appl. Energy*, vol. 206, pp. 739–750, Nov. 2017.
- [125] P. Breeze, “The Economics of Piston Engine Power Plants,” in *Piston Engine-Based Power Plants*, Academic Press, 2018, pp. 87–92.
- [126] U. Environmental Protection Agency, C. Heat, and P. Partnership, “Catalog of CHP Technologies, Full Report, September 2017,” no. September, 2017.
- [127] A. Colmenar-Santos, D. Gómez-Camazón, E. Rosales-Asensio, and J. J. Blanes-Peiró, “Technological improvements in energetic efficiency and sustainability in existing combined-cycle gas turbine (CCGT) power plants,” *Appl. Energy*, vol. 223, pp. 30–51, Aug. 2018.
- [128] M. Hanlon, “Most powerful diesel engine in the world,” *New Atlas*, 2004. [Online]. Disponible en: <https://newatlas.com/go/3263/>. [Fecha de acceso: 26-Jun-2019].
- [129] A. Poullikkas, “An overview of current and future sustainable gas turbine technologies,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 9, no. 5. Pergamon, pp. 409–443, 01-Oct-2005.
- [130] A. Poullikkas, “A technology selection algorithm for independent power producers,” *Electr. J.*, vol. 14, no. 6, pp. 80–84, Jul. 2001.
- [131] R. Bontempo and M. Manna, “Work and efficiency optimization of advanced gas turbine cycles,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 195, pp. 1255–1279, Sep. 2019.
- [132] D. Li, Y. Hu, D. Li, and J. Wang, “Combined-cycle gas turbine power plant integration with cascaded latent heat thermal storage for fast dynamic responses,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 183, pp. 1–13, Mar. 2019.
- [133] “Termoforesis,” *Wikipedia*. [Online]. Disponible en: <https://es.wikipedia.org/wiki/Termoforesis>.

REFERENCIAS DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: García Gómez, S. (2016) *Aplicación de campos electromagnéticos en la eliminación y control de la película biológica en intercambiadores de calor tubulares*

refrigerados por agua de mar. Universidad de Cantabria. Disponible en: <http://catalogo.unican.es/cgi-bin/abnetopac/O7521/IDdf3656f2/NT3> (Fecha de acceso: 5 December 2018).

Ilustración 2: Telegdi, J., Trif, L. and Románszki, L. (2015) ‘Smart anti-biofouling composite coatings for naval applications’, in *Smart Composite Coatings and Membranes: Transport, Structural, Environmental and Energy Applications*. Woodhead Publishing, pp. 123–155. doi: 10.1016/B978-1-78242-283-9.00005-1.

Ilustración 3: <http://www.metaline.de/img/produkte/k0390.jpg>

Ilustración 4: <https://pixnio.com/fauna-animals/mussels-pictures/clubshell-mussel-close-up-pleurobema-clava>

Ilustración 5: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=719485> Canal_de_Suez.jpg,

Ilustración 6: Yebra, D. M., Kiil, S. and Dam-Johansen, K. (2004) ‘Antifouling technology - Past, present and future steps towards efficient and environmentally friendly antifouling coatings’, *Progress in Organic Coatings*. Elsevier, pp. 75–104. doi: 10.1016/j.porgcoat.2003.06.001.

Ilustración 7: adaptación propia de S. Kakaç, *Boilers, Evaporators, and Condensers-Wiley-Interscience*. 1991.

Ilustración 8: <https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcRMjW5OwSuHa2m4i-Qu71UL9hZWimol1tIDL0H7tvKXr0TCNZVx>

Ilustración 9: <https://4.bp.blogspot.com/-o-OKFDw94V4/WOrbr76FZXI/AAAAAAAAAaU/mLlEu8eiCUIKSiyB4e0Ei5eEm95yq4SwCLcB/w640/743819-910220.jpg>

Ilustración 10: Rice, D. *et al.* (2018) ‘Electrochemical self-cleaning anodic surfaces for biofouling control during water treatment’, *Electrochemistry Communications*, 96, pp. 83–87. doi: 10.1016/j.elecom.2018.10.002.

Ilustración 11: el autor.

Ilustración 12: Hua, F. *et al.* (2005) ‘Modeling the hydrogen-induced cracking of titanium alloys in nuclear waste repository environments’, *JOM*. Springer-Verlag, 57(1), pp. 20–26. doi: 10.1007/s11837-005-0059-4.

Ilustración 13: Google Earth Pro.

Ilustración 14: García Gómez, S. (2016) *Aplicación de campos electromagnéticos en la eliminación y control de la película biológica en intercambiadores de calor tubulares refrigerados por agua de mar*. Universidad de Cantabria. Disponible en: <http://catalogo.unican.es/cgi-bin/abnetopac/O7521/IDdf3656f2/NT3> (Fecha de acceso: 5 December 2018).

Ilustración 15: García Gómez, S. (2016) *Aplicación de campos electromagnéticos en la eliminación y control de la película biológica en intercambiadores de calor tubulares refrigerados por agua de mar*. Universidad de Cantabria. Disponible en: <http://catalogo.unican.es/cgi-bin/abnetopac/O7521/IDdf3656f2/NT3> (Fecha de acceso: 5 December 2018).



Ilustración 16: García Gómez, S. (2016) *Aplicación de campos electromagnéticos en la eliminación y control de la película biológica en intercambiadores de calor tubulares refrigerados por agua de mar*. Universidad de Cantabria. Disponible en: <http://catalogo.unican.es/cgi-bin/abnetopac/O7521/IDdf3656f2/NT3> (Fecha de acceso: 5 December 2018).

Ilustración 17: Knutsen, B. (sin fecha) *Knutsen OAS Shipping*. Disponible en: <https://knutsenoas.com/shipping/lng-carriers/sevilla/> (Fecha de acceso: 20 February 2019).

Ilustración 18: https://www.marinetraffic.com/en/ais/details/ships/shipid:163917/mmsi:224072000/immo:9414632/vessel:SEVILLA_KNUTSEN

Ilustración 19: Knutsen, B. (sin fecha) *Knutsen OAS Shipping*. Disponible en: <https://knutsenoas.com/shipping/lng-carriers/sevilla/> (Fecha de acceso: 20 February 2019).

Ilustración 20: https://www.marinetraffic.com/en/ais/details/ships/shipid:167645/mmsi:224606000/immo:9236432/vessel:BILBAO_KNUTSEN

Ilustración 21: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=485198>

Ilustración 22: el autor.

Ilustración 23: el autor.

Ilustración 24: el autor.

Ilustración 25: el autor.

Ilustración 26: el autor.

Ilustración 27: el autor.

Ilustración 28: el autor.

Ilustración 29: el autor.

Ilustración 30: el autor.

Ilustración 31: el autor.

Ilustración 32: el autor.

Ilustración 33: el autor.

Ilustración 34: el autor.

Ilustración 35: el autor.

Ilustración 36: el autor.

Ilustración 37: el autor.

Ilustración 38: el autor.

Ilustración 39: el autor.



Ilustración 40: el autor.

Ilustración 41: el autor.

Ilustración 42: el autor.

Ilustración 43: el autor.

Ilustración 44: el autor.

Ilustración 45: el autor.

Ilustración 46: el autor.

Ilustración 47: el autor.

Ilustración 48: el autor.

Ilustración 49: http://kawasakigasturbines.com/files/Kawasaki_GPB180D.pdf

Ilustración 50: el autor.

Ilustración 51: el autor.

Ilustración 52: el autor.

Ilustración 53: el autor.

Ilustración 54: el autor.

Ilustración 55: el autor.

Ilustración 56: el autor.

REFERENCIAS DE TABLAS

Tabla 1: García Gómez, S. (2016) *Aplicación de campos electromagnéticos en la eliminación y control de la película biológica en intercambiadores de calor tubulares refrigerados por agua de mar*. Universidad de Cantabria. Disponible en: <http://catalogo.unican.es/cgi-bin/abnetopac/O7521/IDdf3656f2/NT3> (Fecha de acceso: 5 December 2018).

Tabla 2: el autor.

Tabla 3: el autor.

Tabla 4: el autor.

Tabla 5: el autor.

Tabla 6: el autor.

Tabla 7: el autor.

Tabla 8: el autor.

Tabla 9: el autor.

Tabla 10: el autor.



Tabla 11: el autor.

Tabla 12: el autor.

REFERENCIAS DE GRÁFICAS

Gráfica 1: generado por el programa Thermoflow.

Gráfica 2: generado por el programa Thermoflow.

Gráfica 3: el autor.

Gráfica 4: el autor.

Gráfica 5: el autor.

Gráfica 6: el autor.

Gráfica 7: el autor.

Gráfica 8: el autor.

Gráfica 9: el autor.

Gráfica 10: el autor.

Gráfica 11: el autor.

Gráfica 12: el autor.

Gráfica 13: el autor.



ANEXO I

ILUSTRACIONES



Ilustración 17: esquema unifilar del buque con sistema de propulsión IEP.

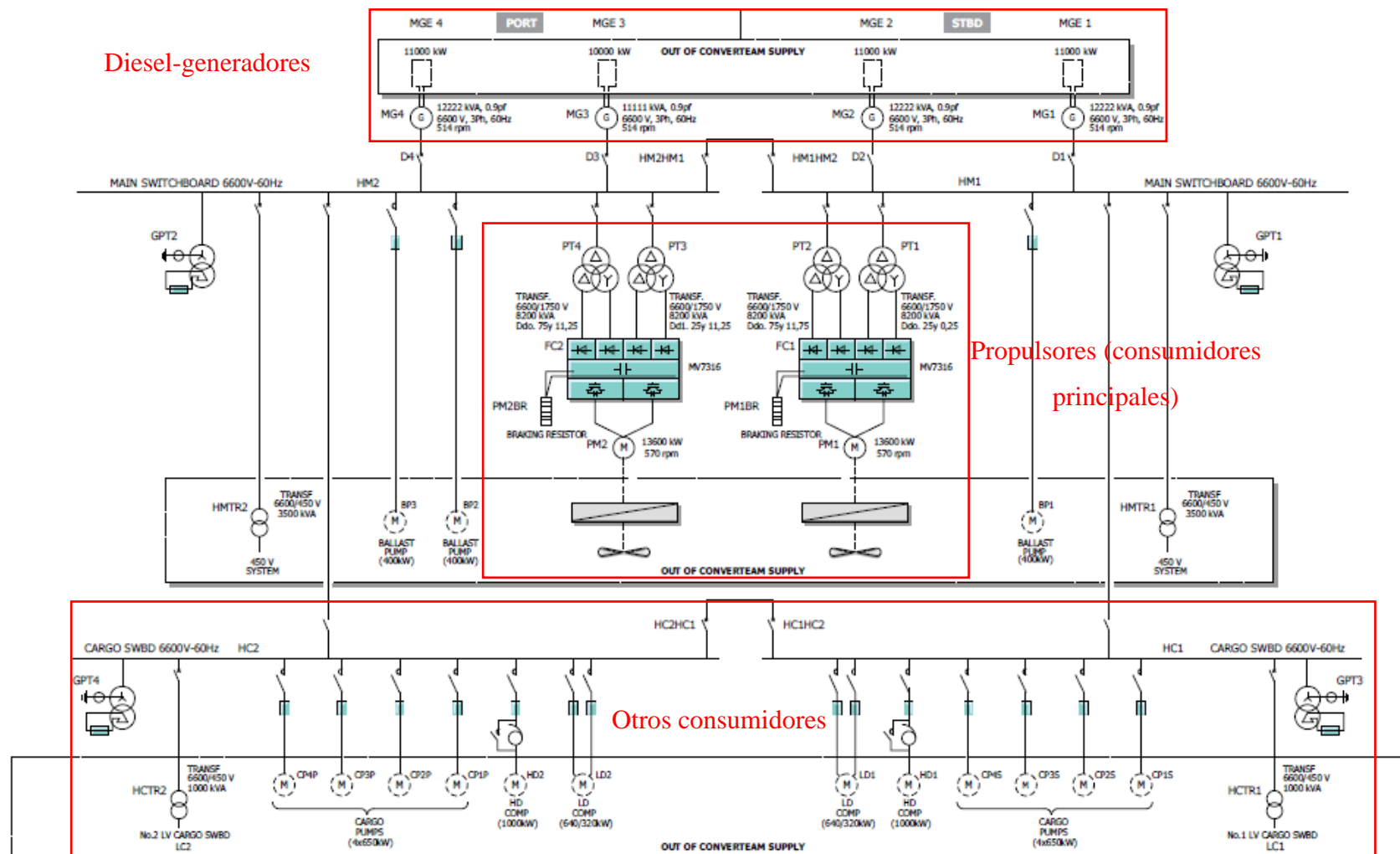




Ilustración 23 e Ilustración 27: esquema empleado para representar la planta con sistema IFEP.

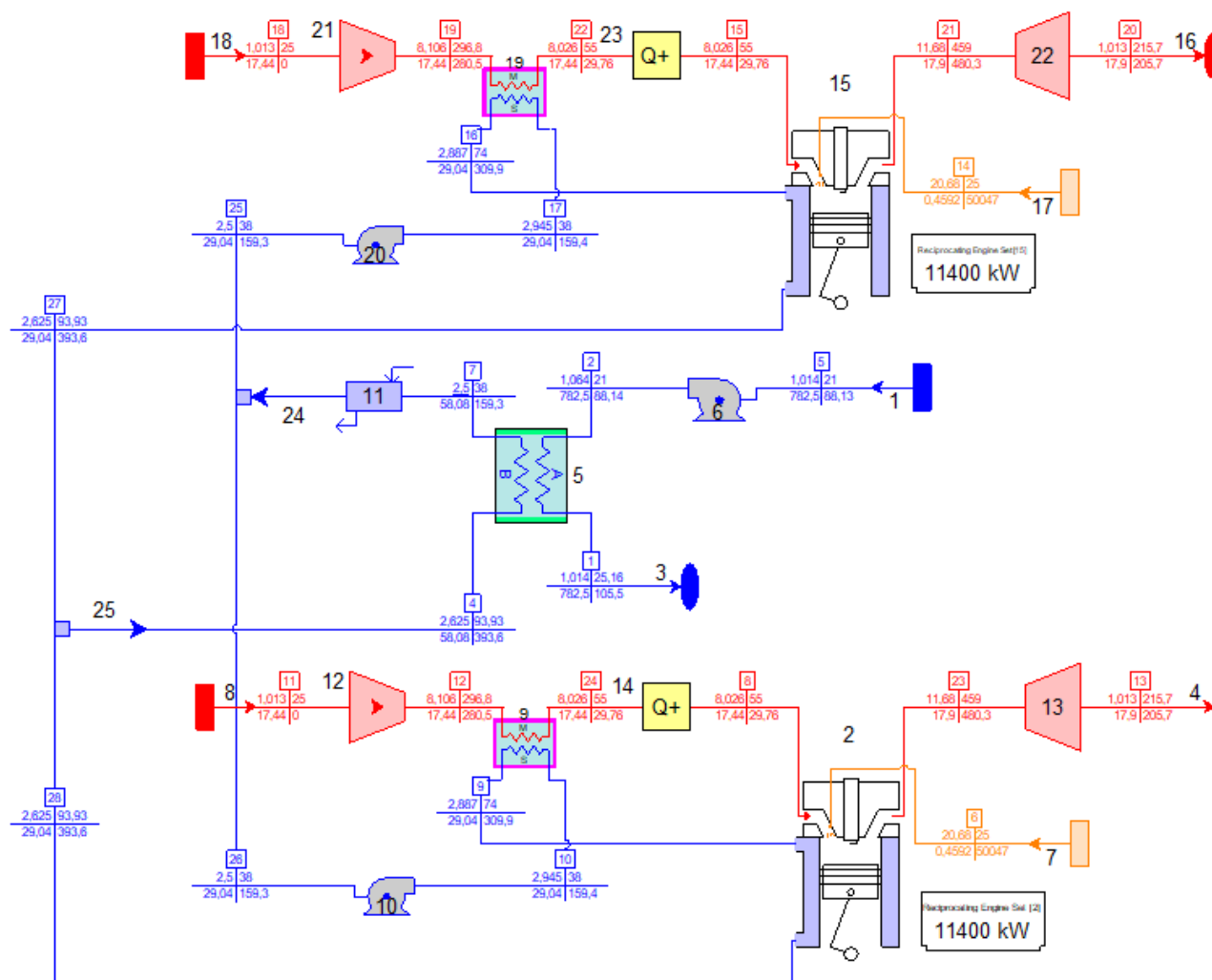




Ilustración 24 e Ilustración 34: esquema empleado para representar la planta con sistemas de turbinas de vapor.

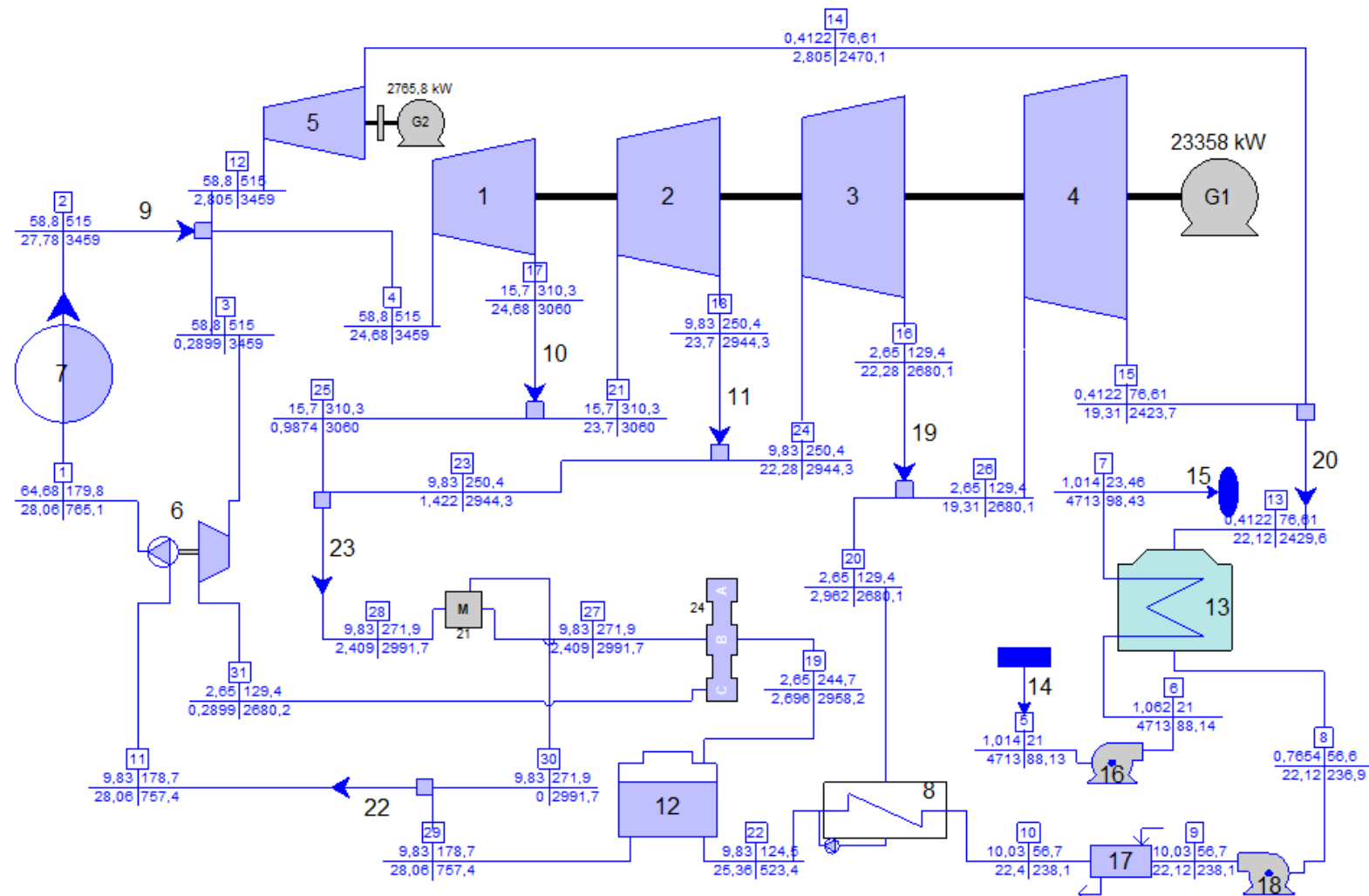






Ilustración 33: ventana de edición del calentador (Heat Adder).

Input Menu - Edit Mode

File GTP/GTM/STM

Site Menu Components Miscellaneous Fix Pressure Gen/Motors

Heat Adder [23]

Main Inputs Other Inputs

Specification

Specified temperature change

☐ Connect heat transfer to another Heat Adder Select Heat Adder

Temperature Change

☐ Temperature rise 0 C

☒ Temperature drop 0 C

Pressure drop 0 %

Heat loss 0 %

Notes



Ilustración 42: valores a introducir en el condensador antes de ejecutar la simulación por primera vez.

Input Menu - Edit Mode

File GTP/GTM/STM

Site Menu Components Miscellaneous Gen/Motors

General Condenser [13] Thermodynamic Design

Normalized heat loss dQ/Q 0 %

Minimum pinch 2.778 C

Condenser pressure 0.96 bar

Coolant outlet state

Temperature 32 C

Quality 0

☒ Subcooled

☐ Saturated

☐ Superheated

Coolant dP/P 2 %

Condensate subcooling 20 C

Water head to condensate outlet 3.6 m H₂O

Notes



Ilustración 43: ventana de edición del condensador en modo “Off-design” y los parámetros iniciales que se deben introducir.

Input Menu - Edit Mode

File GTP/GTM/STM

Site Menu Components Miscellaneous Gen/Motors

General Condenser [13] Off-design

Off-Design Inputs Other Inputs

Coolant Flow Control Mode

Specify coolant flow

Coolant flow as % of design value 100 %

Maximum coolant flow 100 %

Design coolant flow 4389 kg/s

Design point UA 932.3 kW/C

Normalized heat loss dQ/Q 0 %

Coolant outlet state

Temperature 32 C

Quality 0

☐ Subcooled

☐ Saturated

☐ Superheated

Coolant flow resistance coefficient 0.4316 m⁻⁴

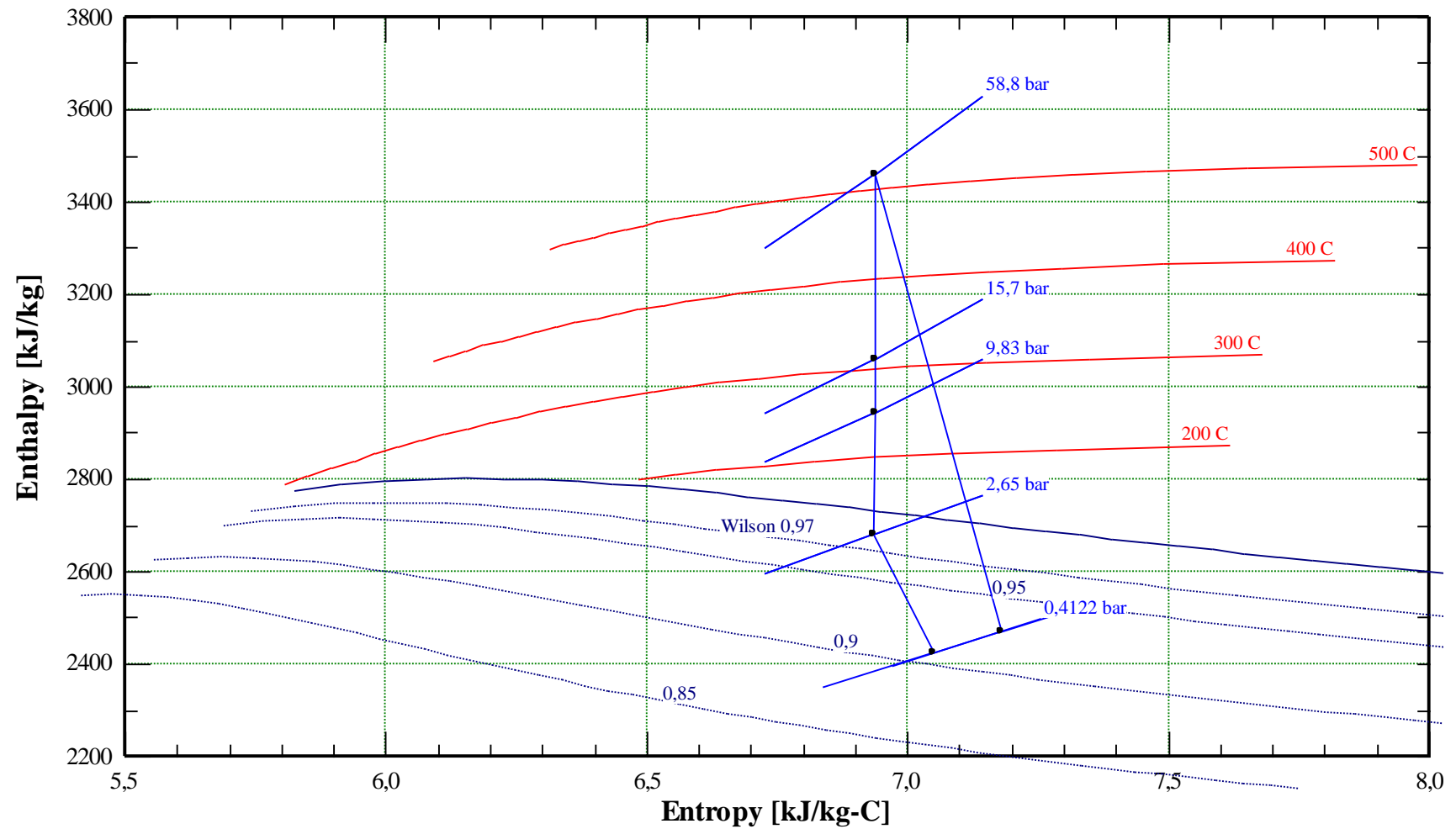
Condensate subcooling 20 C

Water head to condensate outlet 3.6 m H2O

Notes



Gráfica 1: evolución del flujo de vapor a lo largo de la turbina principal (representada por 4 etapas de evolución, línea izquierda) y del turbogenerador (representada por una única pendiente, línea derecha). Diagrama de Mollier de la planta con sistema turbinas de vapor.





Gráfica 2: diagrama de Mollier del turbogenerador principal (izquierda) y del turbogenerador (5) (derecha) de la planta de turbinas de vapor del sistema COGAS. Referente al sistema COGAS.

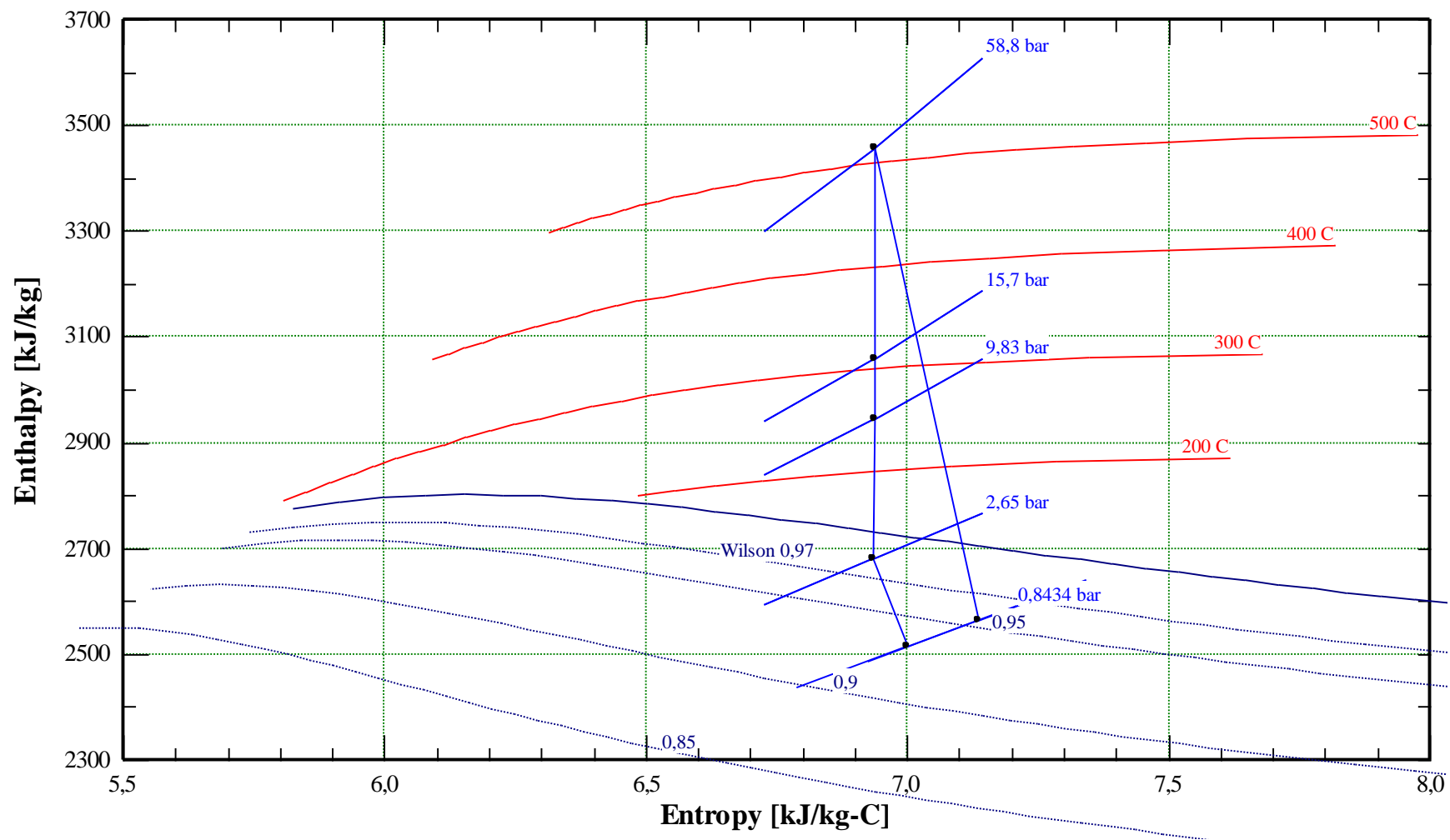
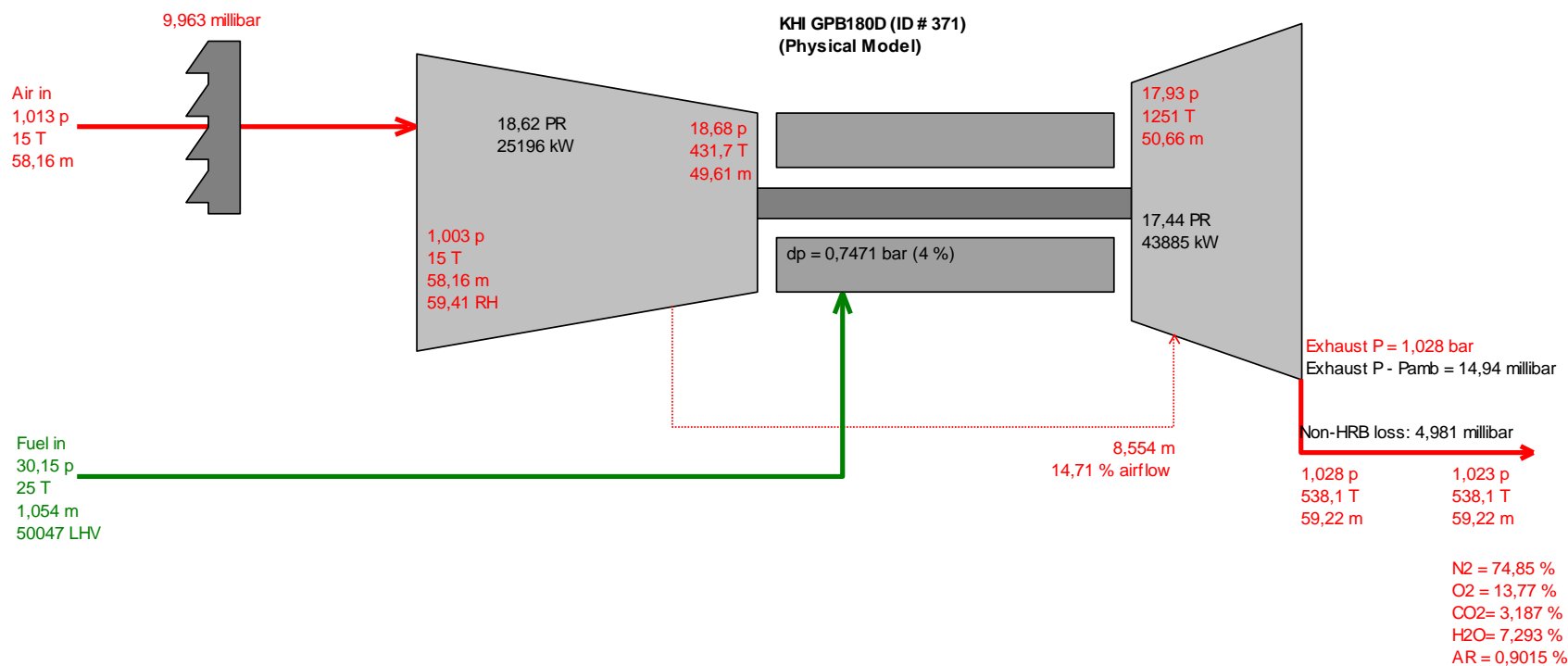




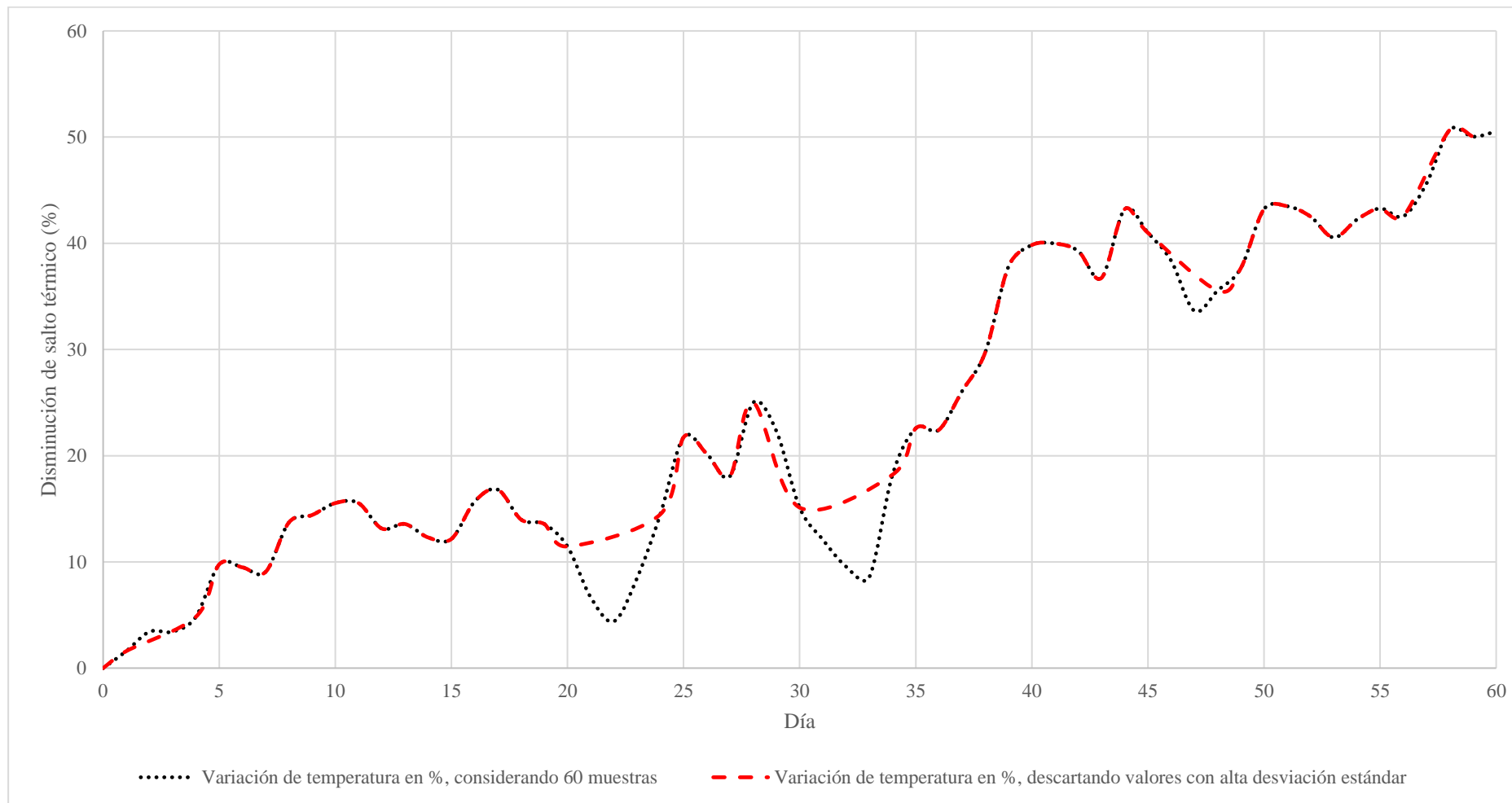
Ilustración 53: parámetros de funcionamiento de la turbina de gas. Ilustración 49: diagrama de la turbina de gas modelo GPB180D.

Gas Turbine Schematic (Engineering Design)

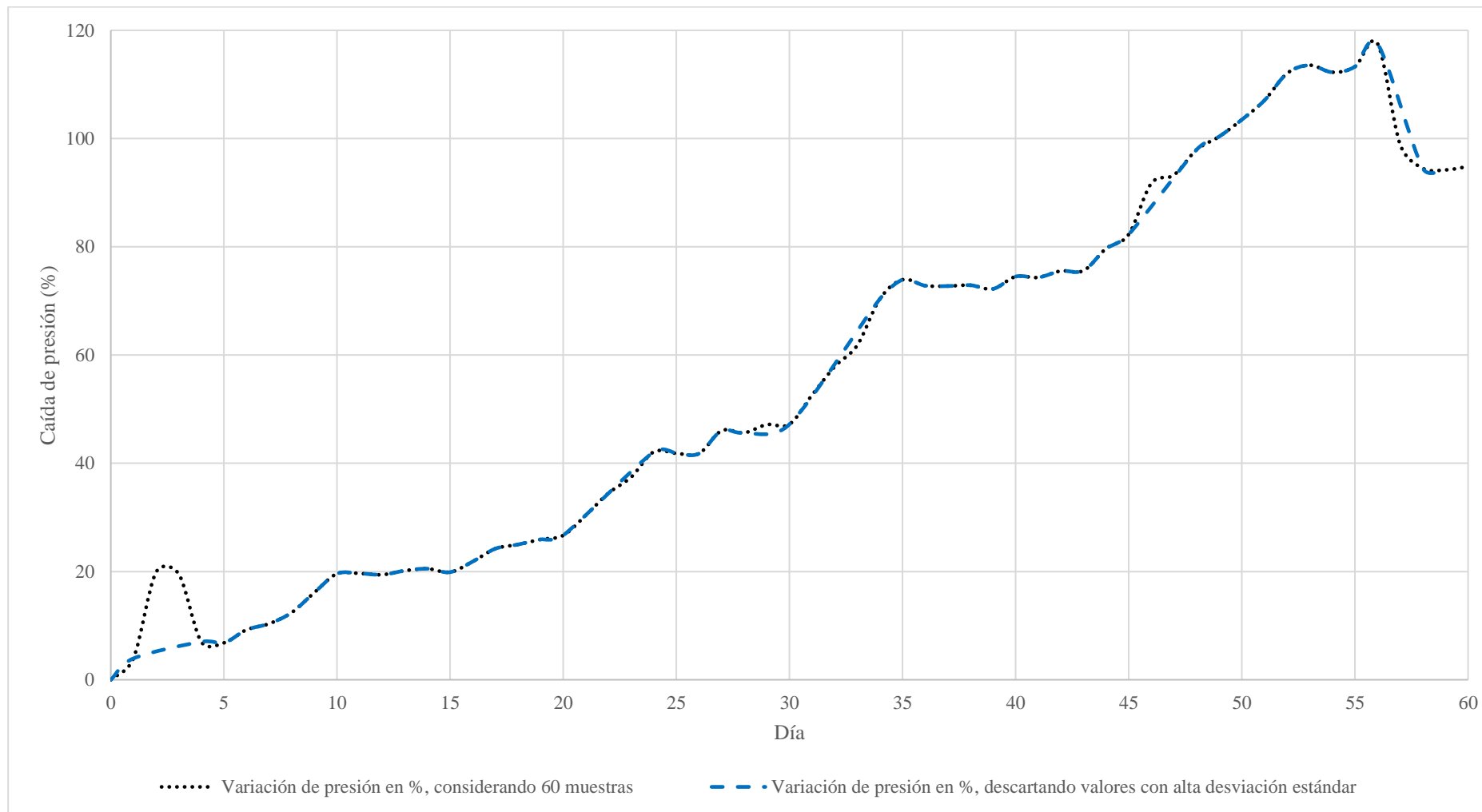
GT generator power = 17807 kW
GT Heat Rate @ gen term = 10668 kJ/kWh
GT efficiency @ gen term = 30,41% HHV = 33,74% LHV
GT @ 100 % rating, inferred TIT control model, CC limit



p[bar] T[C] m[kg/s] h[kJ/kg] Q[kW]



Gráfica 3: variación de temperatura (en %) en función del tiempo (expresado en días) del promedio diario del registro de muestras obtenido de la planta piloto.



Gráfica 4: variación de presión (en %) en función del tiempo (expresado en días) del promedio diario del registro de muestras obtenido de la planta piloto.



| Día | $^1\Delta T \text{ A/S } (\%)$ | $^1\Delta p \text{ A/S } (\%)$ | $^2T \text{ entrada A/S } (^{\circ}\text{C})$ | $^3T \text{ salida Heat adder } (^{\circ}\text{C})$ | $^4\text{Coeficiente de resistencia debido al fouling } (m^{-4})$ | | $^5UA \text{ (kW/m}^3\text{^{\circ}C)}$ | |
|-----|--------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|--------------|-----------------------------------------|--------------|
| | | | | | Planta turbinas | Planta COGAS | Planta turbinas | Planta COGAS |
| 0 | 0 | 0 | 21,0 | 55 | 0 | 0 | 932,3 | 189,8 |
| 7 | 9,1 | 10,4 | 22,9 | 60,0 | 0,89 | 6,94 | 847,8 | 172,6 |
| 14 | 12,3 | 20,5 | 23,6 | 61,8 | 1,77 | 13,75 | 817,6 | 166,4 |
| 18 | 14,0 | 25,0 | 23,9 | 62,7 | 2,16 | 16,75 | 801,9 | 163,2 |
| 24 | 14,5 | 42,1 | 24,0 | 63,0 | 3,63 | 28,22 | 797,3 | 162,3 |
| 27 | 18,1 | 46,0 | 24,8 | 64,9 | 3,97 | 30,85 | 763,8 | 155,5 |
| 35 | 22,6 | 73,9 | 25,7 | 67,4 | 6,38 | 49,54 | 721,8 | 146,9 |
| 38 | 29,8 | 72,9 | 27,3 | 71,4 | 6,29 | 48,86 | 654,7 | 133,3 |
| 43 | 36,7 | 75,6 | 28,7 | 75,2 | 6,53 | 50,67 | 589,8 | 120,1 |
| 45 | 41,0 | 82,3 | 29,6 | 77,5 | 7,10 | 55,17 | 550,1 | 112,0 |
| 50 | 43,2 | 103,5 | 30,1 | 78,8 | 8,93 | 69,37 | 529,4 | 107,8 |
| 55 | 43,3 | 113,3 | 30,1 | 78,8 | 9,78 | 75,94 | 528,8 | 107,6 |
| 59 | 50,0 | 94,2 | 31,5 | 82,5 | 8,13 | 63,15 | 465,8 | 94,8 |



Tabla 10: tabla en la que se recogen el valor inicial más los 12 valores seleccionados. Estos 12 valores han sido escogidos porque se encuentran en intervalos de días (cada 3-8 días) durante los que la evolución del biofouling apenas varía. ¹Valores porcentuales, empleados como datos de partida. También pueden usarse en algunos componentes, como el intercambiador de calor de la planta IEP. ²Temperatura de A/S a la entrada del intercambiador de calor. Es un parámetro que hay que ajustar en las 3 plantas. ³Temperatura de salida del Heat Adder, exclusivo de la planta IEP. La ventana de edición de este permite indicar de varias formas la temperatura final, ya sea como una variación o como el valor de salida final (en la tabla se indica como el valor de salida final, pero en los cálculos se muestra como una variación). ⁴Parámetro exclusivo de las plantas de turbinas y COGAS. Para cada planta hay unos valores asignados debido a que circulan diferentes caudales de A/S. ⁵Coefficiente de transferencia de calor global, UA, expresado en $\text{kW/m}^3\text{°C}$ (es la unidad en la que viene expresada en el programa). Para cada planta hay unos valores asignados debido a que circulan diferentes caudales de A/S.



| VARIABLE DE SALIDA | Unidad/Día | 0 | 7 | 14 | 18 | 24 | 27 | 35 | 38 | 43 | 45 | 50 | 55 | 59 |
|--------------------------------------------|-------------------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Caudal de A/S | kg/s | 782,5 | 782,5 | 782,5 | 782,5 | 782,5 | 782,5 | 782,5 | 782,5 | 782,5 | 782,5 | 782,5 | 782,5 | 782,5 |
| Potencia bomba A/S | kW | 6 | 12 | 23 | 28 | 46 | 50 | 80 | 79 | 82 | 89 | 112 | 123 | 102 |
| Relación potencia-caudal bomba | Ws/kg | 7 | 15 | 29 | 35 | 59 | 64 | 103 | 101 | 105 | 114 | 143 | 157 | 131 |
| Presión de descarga bomba A/S | bar | 1,1 | 1,1 | 1,2 | 1,3 | 1,4 | 1,5 | 1,8 | 1,8 | 1,8 | 1,8 | 2,1 | 2,2 | 2,0 |
| Caída de presión en interc. de c. | bar | 0,1 | 0,1 | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,5 | 0,7 | 0,7 | 0,8 | 0,8 | 1,0 | 1,1 | 1,0 |
| Temperatura de salida A/S | °C | 25,2 | 26,7 | 27,2 | 27,5 | 27,6 | 28,2 | 29,0 | 30,2 | 31,4 | 32,1 | 32,5 | 32,5 | 33,6 |
| Temperatura de entrada A/S | °C | 21,0 | 22,9 | 23,6 | 23,9 | 24,0 | 24,8 | 25,7 | 27,3 | 28,7 | 29,6 | 30,1 | 30,1 | 31,5 |
| Salto térmico | °C | 4,2 | 3,8 | 3,7 | 3,6 | 3,6 | 3,4 | 3,2 | 2,9 | 2,7 | 2,5 | 2,4 | 2,4 | 2,1 |
| Transfer. de c. en el interc. de c. | kW | 13608 | 12374 | 11934 | 11704 | 11637 | 11148 | 10535 | 9557 | 8608 | 8030 | 7727 | 7718 | 6804 |
| Potencia neta | kW | 22456 | 22272 | 22197 | 22159 | 22131 | 22056 | 21937 | 21797 | 21657 | 21566 | 21500 | 21488 | 21376 |
| Rendimiento | % | 48,9 | 48,7 | 48,6 | 48,5 | 48,5 | 48,4 | 48,2 | 48,1 | 47,9 | 47,8 | 47,7 | 47,7 | 47,6 |
| Potencia motor [15] | kW | 11400 | 11311 | 11279 | 11262 | 11258 | 11222 | 11178 | 11107 | 11039 | 10997 | 10975 | 10974 | 10908 |
| Potencia motor [2] | kW | 11400 | 11311 | 11279 | 11262 | 11258 | 11222 | 11178 | 11107 | 11039 | 10997 | 10975 | 10974 | 10908 |
| Potencia total | kW | 22808 | 22808 | 22808 | 22808 | 22808 | 22808 | 22808 | 22808 | 22808 | 22808 | 22808 | 22808 | 22808 |
| Equipos auxiliares | kW | 238 | 244 | 255 | 260 | 278 | 282 | 312 | 311 | 314 | 321 | 344 | 355 | 334 |
| Pérdidas del transformador | kW | 114 | 114 | 114 | 114 | 114 | 114 | 114 | 114 | 114 | 114 | 114 | 114 | 114 |

Tabla 11: variables de salida obtenidas de la planta IEP para los días especificados.



| VARIABLE DE SALIDA | Unidad/Día | 0 | 7 | 14 | 18 | 24 | 27 | 35 | 38 | 43 | 45 | 50 | 55 | 59 |
|--------------------------------------------|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Caudal de A/S | kg/s | 4713 | 4713 | 4713 | 4713 | 4713 | 4713 | 4713 | 4713 | 4713 | 4713 | 4713 | 4713 | 4713 |
| Potencia bomba A/S | kW | 31 | 64 | 127 | 154 | 258 | 282 | 451 | 445 | 462 | 503 | 632 | 691 | 576 |
| Relación potencia-caudal bomba | Ws/kg | 7 | 14 | 27 | 33 | 55 | 60 | 96 | 95 | 98 | 107 | 134 | 147 | 122 |
| Presión de descarga bomba A/S | bar | 1,1 | 1,1 | 1,2 | 1,3 | 1,4 | 1,5 | 1,7 | 1,7 | 1,7 | 1,8 | 2,0 | 2,1 | 1,9 |
| Caída de presión en interc. de c. | bar | 0,0 | 0,1 | 0,2 | 0,2 | 0,4 | 0,4 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,8 | 1,0 | 1,1 | 0,9 |
| Temperatura de salida A/S | °C | 23,5 | 25,2 | 25,8 | 26,1 | 26,2 | 26,8 | 27,7 | 29,0 | 30,3 | 31,1 | 31,5 | 31,5 | 32,8 |
| Temperatura de entrada A/S | °C | 21,0 | 22,9 | 23,6 | 23,9 | 24,0 | 24,8 | 25,7 | 27,3 | 28,7 | 29,6 | 30,1 | 30,1 | 31,5 |
| Salto térmico | °C | 2,5 | 2,3 | 2,2 | 2,1 | 2,1 | 2,0 | 1,9 | 1,8 | 1,6 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,3 |
| Transfer. de c. en el interc. de c. | kW | 48500 | 44286 | 42774 | 41984 | 41753 | 40068 | 37946 | 34537 | 31212 | 29173 | 28103 | 28070 | 24826 |
| Potencia neta | kW | 25437 | 25206 | 25072 | 25008 | 24893 | 24789 | 24520 | 24367 | 24195 | 24059 | 23880 | 23819 | 23779 |
| Rendimiento | % | 32,92 | 32,62 | 32,45 | 32,36 | 32,21 | 32,08 | 31,73 | 31,53 | 31,31 | 31,13 | 30,90 | 30,82 | 30,77 |
| Presión de condensación | bar | 0,4 | 0,4 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 |
| Temperatura de condensación | °C | 76,6 | 78,6 | 79,3 | 79,7 | 79,8 | 80,6 | 81,6 | 83,2 | 84,7 | 85,7 | 86,2 | 86,2 | 87,7 |
| Turbina principal | kW | 23358 | 23186 | 23124 | 23091 | 23082 | 23013 | 22926 | 22787 | 22651 | 22568 | 22524 | 22523 | 22387 |
| Turbogenerador | kW | 2766 | 2737 | 2726 | 2721 | 2719 | 2708 | 2693 | 2671 | 2649 | 2635 | 2628 | 2628 | 2606 |
| Potencia total | kW | 26124 | 25923 | 25850 | 25812 | 25801 | 25721 | 25619 | 25458 | 25300 | 25203 | 25152 | 25150 | 24993 |
| Equipos auxiliares | kW | 556 | 587 | 649 | 676 | 780 | 803 | 971 | 964 | 979 | 1019 | 1147 | 1206 | 1089 |



| | | | | | | | | | | | | | | |
|-----------------------------------|-----------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Pérdidas del transformador | kW | 131 | 130 | 129 | 129 | 129 | 129 | 128 | 127 | 126 | 126 | 126 | 126 | 125 |
|-----------------------------------|-----------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|

Tabla 12: variables de salida obtenidas de la planta de turbinas de vapor para los días especificados.

| VARIABLE DE SALIDA | Unidad/Día | 0 | 7 | 14 | 18 | 24 | 27 | 35 | 38 | 43 | 45 | 50 | 55 | 59 |
|--------------------------------------------|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Caudal de A/S | kg/s | 1216 | 1216 | 1216 | 1216 | 1216 | 1216 | 1216 | 1216 | 1216 | 1216 | 1216 | 1216 | 1216 |
| Potencia bomba A/S | kW | 4 | 9 | 17 | 21 | 35 | 39 | 61 | 61 | 63 | 68 | 86 | 94 | 78 |
| Relación potencia-caudal bomba | Ws/kg | 4 | 7 | 14 | 17 | 29 | 32 | 51 | 50 | 52 | 56 | 71 | 77 | 64 |
| Presión de descarga bomba A/S | bar | 1,0 | 1,1 | 1,1 | 1,1 | 1,2 | 1,2 | 1,4 | 1,4 | 1,4 | 1,4 | 1,5 | 1,6 | 1,5 |
| Caída de presión en interc. de c. | bar | 0,0 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,2 | 0,2 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,5 |
| Temperatura de salida A/S | °C | 23,7 | 25,4 | 26,0 | 26,3 | 26,4 | 27,0 | 27,9 | 29,2 | 30,5 | 31,2 | 31,7 | 31,7 | 32,9 |
| Temperatura de entrada A/S | °C | 21,0 | 22,9 | 23,6 | 23,9 | 24,0 | 24,8 | 25,7 | 27,3 | 28,7 | 29,6 | 30,1 | 30,1 | 31,5 |
| Salto térmico | °C | 2,7 | 2,5 | 2,4 | 2,3 | 2,3 | 2,2 | 2,1 | 1,9 | 1,7 | 1,6 | 1,6 | 1,6 | 1,4 |
| Transfer. de c. en el interc. de c. | kW | 13680 | 12499 | 12075 | 11853 | 11788 | 11315 | 10719 | 9761 | 8825 | 8251 | 7949 | 7940 | 7026 |
| Potencia neta | kW | 24022 | 23959 | 23929 | 23915 | 23897 | 23871 | 23818 | 23772 | 23723 | 23689 | 23657 | 23649 | 23617 |
| Rendimiento | % | 45,52 | 45,40 | 45,35 | 45,32 | 45,29 | 45,24 | 45,14 | 45,05 | 44,96 | 44,89 | 44,83 | 44,81 | 44,75 |
| Presión de condensación | bar | 0,8 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,1 | 1,1 | 1,2 | 1,2 | 1,2 | 1,3 |
| Temperatura de condensación | °C | 94,9 | 97,0 | 97,8 | 98,2 | 98,3 | 99,1 | 100,2 | 101,8 | 103,5 | 104,4 | 105,0 | 105,0 | 106,6 |



| | | | | | | | | | | | | | | |
|-----------------------------------|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Turbogenerador principal | <i>kW</i> | 5939 | 5888 | 5870 | 5860 | 5857 | 5836 | 5810 | 5769 | 5728 | 5703 | 5690 | 5690 | 5648 |
| Turbogenerador auxiliar | <i>kW</i> | 685 | 677 | 674 | 672 | 672 | 669 | 665 | 658 | 652 | 648 | 646 | 646 | 640 |
| Turbina de gas | <i>kW</i> | 17807 | 17807 | 17807 | 17807 | 17807 | 17807 | 17807 | 17807 | 17807 | 17807 | 17807 | 17807 | 17807 |
| Potencia total | <i>kW</i> | 24431 | 24372 | 24351 | 24339 | 24336 | 24312 | 24282 | 24234 | 24187 | 24158 | 24143 | 24143 | 24095 |
| Equipos auxiliares | <i>kW</i> | 287 | 291 | 299 | 303 | 317 | 320 | 343 | 341 | 343 | 348 | 365 | 374 | 357 |
| Pérdidas del transformador | <i>kW</i> | 122 | 122 | 122 | 122 | 122 | 122 | 121 | 121 | 121 | 121 | 121 | 121 | 120 |

Tabla 13: variables de salida obtenidas de la planta COGAS para los días especificados.



ANEXO II

AVISOS:

Este documento es el resultado del Trabajo Fin de Grado de un alumno, siendo su autor responsable de su contenido. Se trata por tanto de un trabajo académico que puede contener errores detectados por el tribunal y que pueden no haber sido corregidos por el autor en la presente edición. Debido a dicha orientación académica no se recomienda hacer un uso profesional de su contenido. Este tipo de trabajos, junto con su defensa, pueden haber obtenido una nota que oscila entre 5 y 10 puntos, por lo que la calidad y el número de errores que puedan contener difieren en gran medida entre unos trabajos y otros. La Universidad de Cantabria, la Escuela Técnica Superior de Náutica, los miembros del Tribunal de Trabajos Fin de Grado, así como el profesor/tutor/director no son responsables del contenido último de este Trabajo.

Los gráficos, ilustraciones, imágenes, o tablas que no contienen autoría han sido elaboradas por el autor del trabajo.

